

經濟部



鋼鐵冶鍊業

土壤及地下水污染預防與整治技術手冊



經濟部工業局 編印

序

「土壤及地下水污染整治法」(以下簡稱土污法)自 89 年 2 月公布施行以來，環保署為展現處理土壤及地下水污染問題之決心，已陸續針對具有污染潛勢場址及廢棄工廠，進行土壤及地下水污染調查及查證工作，並依法公告列管污染場址，以妥善處理土壤及地下水污染問題。此外，環保署為預防土水污染及釐清污染責任，於土污法第 8 條第 1 項規定，指定公告事業用地移轉時，讓與人必須提供土壤污染檢測資料予受讓人；另於同法第 9 條規定，指定公告事業於設立、停業、歇業前，應檢具用地土壤污染檢測資料報請所在地主管機關備查後，始得向目的事業主管機關申報相關事宜，以建立指定公告事業用地之控管機制。為符合環保法規規定，以預防、處理土壤及地下水污染問題，產業所面對的土壤及地下水污染問題已漸趨複雜。

本局為提升國內產業土壤及地下水污染預防、應變、調查與整治之能力，95 年度委託財團法人台灣產業服務基金會與中興工程顧問股份有限公司，並邀請國內具執行土水污染預防、調查、整治豐富經驗專家學者，共同編製光電材料及元件製造業與鋼鐵冶鍊業二行業及重金屬污染類型之土壤及地下水污染預防及整治技術手冊。本技術手冊係為協助鋼鐵冶鍊業進行土壤及地下水污染預防與整治工作，透過蒐集國內外相關調查研究成果、技術應用及案例，彙整編撰整合性土壤及地下水污染預防與整治技術手冊，並針對土壤及地下水污染之來源及污染物特性、預防與監測、污染調查、整治技術、整治工程實施程序、土污法對產業影響與因應對策等議題，並提供國內外相關預防、調查與整治案例等，以提升業者保護土壤及地下水資源之知識與能力，達到企業永續經營之目標。

本技術手冊編撰過程，承蒙各編審委員及撰稿者竭盡所長的提供相關寶貴經驗與案例，並於百忙之中全力參與編輯及審稿工作，使本手冊得以付梓，謹致上最誠摯之謝忱。

經濟部工業局謹識

中華民國 95 年 12 月

鋼鐵冶鍊業土壤及地下水污染 預防與整治技術手冊

目錄

	頁次
第一章 前言	1
第二章 鋼鐵冶鍊業污染來源及污染特性	3
2.1 行業製程特性	3
2.1.1 一貫作業煉鋼廠製程特性	3
2.1.2 電弧爐煉鋼廠製程特性	7
2.2 污染來源及污染特性	11
2.2.1 廢水來源及污染特性	11
2.2.1 廢棄物來源及污染特性	13
2.2.3 其他污染來源及污染特性	19
2.3 污染物類型及在環境中的傳輸	20
第三章 土壤及地下水污染預防與監測	25
3.1 廠內環境管理及污染評估	25
3.1.1 環境管理	25
3.1.2 污染評估	27
3.2 工廠污染預防措施	32
3.2.1 污染預防管理原則	32
3.2.2 污染預防措施	33
3.3 土壤及地下水品質監測計畫研擬	37
3.4 緊急應變計畫	40
3.4.1 因應緊急事件之準備	40
3.4.2 緊急應變	41
第四章 工廠土壤及地下水污染調查	47
4.1 污染調查應考慮事項	47
4.1.1 採樣目的	47
4.1.2 採樣的代表性	48

4.1.3	採樣的限制	48
4.2	擬定土壤及地下水污染調查計畫	49
4.2.1	場址概念模式之建立	49
4.2.2	訂定土壤及地下水採樣計畫	52
4.3	土壤及地下水採樣方式與檢測方法	55
4.3.1	選擇採樣工具	55
4.3.2	採樣點配置	59
4.3.3	樣品保存與分析方法	60
4.4	快速篩試工具之應用	63
4.4.1	重金屬快速篩試方法	63
4.4.2	揮發性有機物快速篩試方法	66
4.5	土壤及地下水污染調查案例介紹	70
4.5.1	快速篩試案例介紹	70
4.5.2	土壤污染調查案例介紹	72
4.5.3	土壤及地下水污染調查案例介紹	74
4.6	專業機構聘請	74
第五章	土壤及地下水污染整治技術	79
5.1	土壤污染整治技術	79
5.1.1	固化/穩定化法	79
5.1.2	玻璃化法	92
5.1.3	土壤清洗與酸洗法	95
5.1.4	高溫分離法	97
5.1.5	現地土壤沖洗法	99
5.1.6	土壤氣體抽除法	103
5.1.7	生物通氣法	105
5.1.8	戴奧辛土壤污染整治技術	108
5.1.9	整治列車技術	112
5.2	地下水污染整治技術	114
5.2.1	抽取處理法	114
5.2.2	沉澱及共沉澱法	114
5.2.3	薄膜過濾法	117

5.2.4	吸附法	119
5.2.5	離子交換法	121
5.2.6	透水性反應牆	124
5.2.7	空氣注入法	132
5.2.8	現地地下水生物整治法	136
5.3	適用同時整治土壤與地下水污染之整治技術	139
5.3.1	電動力法	139
5.3.2	植生復育法	150
5.3.3	生物漱洗法	159
5.4	整治案例介紹	163
5.4.1	固定/穩定化法整治案例	163
5.4.2	土壤清洗法整治案例	163
5.4.3	土壤酸洗法整治案例	164
5.4.4	植生復育案例介紹	172
5.4.5	土壤氣體抽除法	172
5.4.6	土壤戴奧辛污染整治案例	173
5.4.7	空氣注入法搭配土壤氣體抽除整治案例	173
5.4.8	現地地下水生物整治案例	174
第六章	土壤及地下水污染整治工程實施程序	181
6.1	整治技術可行性評估與選擇	181
6.2	控制與整治計畫研擬	189
6.3	環保機關控制與整治計畫審查與驗證作業程序	196
6.4	整治施工承包商評估及選擇	198
第七章	土污法對產業影響及因應對策	201
7.1	土壤及地下水污染整治費之徵收	201
7.2	工廠土地移轉、設立、停業或歇業之土壤污染檢測規定	205
7.3	工廠遭土污法列管之作業程序與因應對策	211
7.4	土污法相關訴願程序或行政訴訟	218
	名詞索引	225

圖目錄

	<u>頁次</u>
圖 2-1 一貫作業煉鋼廠生產流程	4
圖 2-2 碳鋼電弧爐煉鋼製造流程	8
圖 2-3 不鏽鋼製造流程	9
圖 3-1 LNAPL(油品)於地下環境中移動及分布情形	29
圖 3-2 LNAPL 隨地下水位變動形成油漬區	30
圖 3-3 工廠儲槽管線測漏計畫範例	36
圖 3-4 工廠土壤及地下水品質監測計畫工作流程範例	38
圖 3-5 工廠緊急應變處理流程	42
圖 3-6 吸油棉與吸油索及於污染場址使用狀況	44
圖 4-1 以圖示方法展示油品污染場址概念模式	50
圖 4-2 以水文地質剖面圖展示油品污染場址概念模式(水文地質概念模式)	51
圖 4-3 污染暴露途徑(人類為受體)之場址概念模式	51
圖 4-4 土壤採樣流程	53
圖 4-5 地下水採樣流程	54
圖 4-6 土鑽採樣組及現場使用狀況	55
圖 4-7 直接貫入鑽機現場操作狀況	57
圖 4-8 中空螺旋鑽機現場操作狀況	57
圖 4-9 鑽堡現場操作狀況	58
圖 4-10 貝勒管現場操作狀況	58
圖 4-11 工廠地下水監測井配置範例	60
圖 4-12 各型攜帶式 X 射線螢光偵測器	64
圖 4-13 DMA-80 汞分析儀	65
圖 4-14 不同地下環境之揮發性有機物濃度梯度	67
圖 4-15 土壤氣體探測管類型	68
圖 4-16 各式攜帶式土壤氣體分析儀器	69
圖 4-17 國內某加油站鄰近地區土壤氣體調查結果	72
圖 4-18 台南市某明膠工廠周圍使用狀況及採樣位置示意圖	73

圖 5-1	現地穩定化及穩定/固化處理技術	84
圖 5-2	離地穩定/固定化處理流程示意圖	92
圖 5-3	現地穩定/固定化處理流程示意圖	92
圖 5-4	酸洗法流程示意圖	97
圖 5-5	現地沖洗法示意圖	99
圖 5-6	土壤氣抽除系統示意圖	103
圖 5-7	水平式土壤氣體抽除系統示意圖	104
圖 5-8	生物通氣系統示意圖	106
圖 5-9	利用抽氣井及添加營養鹽之生物通氣法	107
圖 5-10	澳洲 Homebush Bay 戴奧辛污染整治之鹼性催化分解法處理流程圖	111
圖 5-11	金屬污染土壤整治技術處理成本範圍	112
圖 5-12	抽取處理系統	114
圖 5-13	沉澱及共沉澱處理系統	115
圖 5-14	薄膜過濾系統	118
圖 5-15	吸附處理系統	120
圖 5-16	離子交換系統	122
圖 5-17	典型透水性反應牆示意圖	124
圖 5-18	各類型透水性反應牆	128
圖 5-19	透水性反應牆之設計方法	129
圖 5-20	透水性反應牆之設計流程圖	130
圖 5-21	空氣注入系統示意圖	133
圖 5-22	空氣注入法與土壤氣體抽除法聯合應用類型	135
圖 5-23	土壤不均質性造成注入氣體無法通過受污染區之示意圖	135
圖 5-24	採滲水渠道之現地地下水生物整治法示意圖	136
圖 5-25	採注入井之現地地下水生物整治法示意圖	137
圖 5-26	電動力法處理原理示意圖	140
圖 5-27	植生復育處理機制	150
圖 5-28	生物漱洗法示意圖	159
圖 5-29	傳統雙幫浦、汲油器與生物漱洗法浮油回收方式之比較	161
圖 5-30	井內油水分離式之生物漱洗系統示意圖	161

圖 5-31	美國 Small-Arms Range 鉛污染場址物理分離程序	164
圖 5-32	污染改善工程實施流程圖	166
圖 5-33	酸淋洗法示意圖(一)	169
圖 5-34	固定式酸淋洗法示意圖(二)	169
圖 5-35	廢水處理系統設備	171
圖 5-36	日本和歌山縣橋本市土壤戴奧辛污染整治流程圖	173
圖 6-1	整治調查與可行性評估的流程與工作內容	182
圖 6-2	初步篩選與細部分析準則之關係	186
圖 6-3	污染改善完成驗證作業流程	197
圖 7-1	環保署網格法進行採樣佈點之規劃流程	207
圖 7-2	環保機關對工廠土壤及地下水污染場址管制作業流程	211
圖 7-3	初評辦法之評估程序	216
圖 7-4	行政爭訟流程圖	218
圖 7-5	訴願案件流程處理簡圖	219

表目錄

	<u>頁次</u>
表 2-1 生鐵與鋼的成分比較	6
表 2-2 煉鐵製程之廢棄物來源、成分、特性與清理流向	14
表 2-3 碳鋼電弧爐煉鋼製程之廢棄物來源、成分、特性與清理流向	17
表 2-4 不銹鋼電弧爐煉鋼製程之廢棄物來源、成分、特性與清理流向	18
表 3-1 TDK 公司 2004 年土壤污染整治情況	26
表 3-2 政府機關水文地質資料內容及來源	28
表 4-1 土壤採樣方法適用之地質特性	56
表 4-2 土壤採樣方法適用之污染物種類	56
表 4-3 土壤採樣配置方式比較表	59
表 4-4 土壤及地下水樣品最少需要量與保存方法	61
表 4-5 土壤及地下水檢測方法	62
表 4-6 XRF 重金屬偵測極限與我國土壤污染監測基準與管制標準	65
表 5-1 可能影響穩定化作用的因素	87
表 5-2 可能影響固化作用的因素	88
表 5-3 固化/穩定化處理一般類別污染物污染土壤及污泥之有效程度	91
表 5-4 元素在矽酸玻璃中之大約溶解度	94
表 5-5 現地沖洗法建造特性資料	102
表 5-6 土壤氣體抽除法優缺點彙整表	104
表 5-7 生物通氣法優缺點彙整表	106
表 5-8 整治列車技術彙整	113
表 5-9 沉澱/共沉澱法經濟分析案例	117
表 5-10 透水性反應牆處理技術的種類	125
表 5-11 空氣注入法優缺點彙整表	133
表 5-12 現地地下水生物整治法優缺點彙整表	137
表 5-13 美國電動力現地整治及實場研究	147
表 5-14 國內電動力法處理重金屬污染土壤之相關研究	149
表 5-15 植生復育技術概述	151
表 5-16 高累積植物物種	152

表 5-17	植生技術之優缺點分析	154
表 5-18	植生技術經濟分析案例	156
表 5-19	生物漱洗法優缺點彙整表	160
表 5-20	酸洗處理經費整理表	167
表 5-21	公告場址重金屬污染濃度超過管制標準倍數之地號數	168
表 6-1	土壤及地下水污染控制計畫與整治計畫之內容	189
表 6-2	承包商選擇之特殊考量因子範例	199
表 7-1	符合土污法第 11 條第 1 項之新投資於預防土壤、地下水污染 有直接效益之設備或工程項目	204
表 7-2	環境場址潛在污染評估之最少土壤採樣點數	206
表 7-3	鋼鐵冶鍊業污染物檢測項目	208
表 7-4	土污法第 8、9 條規定之相關問題與因應對策	208

第一章 前言

政府為使產業做好污染預防與整治工作，於「土壤及地下水污染整治法」(以下簡稱土污法)中加重污染行為人之責任，並訂定相關刑罰之規定，例如違反其規定所應盡之義務，因而致人於死或重傷之處罰，故意污染土地，因而致人於死或重傷之處罰，對於依該法作成之文書，為虛偽記載者之處罰，不遵行主管機關之停止作為、停業、部分或全部停工等規定之處罰，對法人或自然人科處罰金之處罰等。此外，自土污法公布施行以來，業者對於土污法相關法令之規定，可能會因為專業能量不足及認知上的落差，而在執行上遭遇到困難，從而因違反法令遭受環保單位處分。

土壤及地下水污染不僅會影響企業的形象與商譽，如工廠經環保機關公告為土壤及地下水污染場址時，對企業經營的影響與衝擊更大，將使土地市價減少，妨礙土地利用，減低銀行融資意願。為謀求事業永續發展，企業宜建置環境管理與查核系統，並納入土壤及地下水污染預防與整治，以長期、持續有系統的監督土壤及地下水品質狀況。

爰此，經濟部工業局積極推動產業進行土壤及地下水污染預防工作，以降低土壤及地下水污染風險。然而土壤與地下水污染預防、調查與整治技術跨越眾多專業領域，且國內相關資訊較為缺乏，經濟部工業局彙整相關污染預防、調查與整治技術資料，提供產業於規劃、執行或選用相關污染預防、調查與整治技術時，能有完整資訊得以參考。

土壤與地下水污染預防工作應從源頭上管制污染物，使其不進入土壤及地下水。土壤及地下水污染來源包括「氣相」的空氣污染物、「固相」的污染物、及「液相」的污染廢液與廢水，因此做好空氣污染防治、廢水處理、廢棄物貯存與處置工作，並加強廠區工安管理以避免意外事件，加強監測土壤及地下水的品質，切斷污染物進入土壤及地下水的途徑，就有很大的機會達到污染預防的目標。此外，當土壤及地下水污染事件發生時，廠方應採取那些緊急應變措施、如何立即阻絕污染來源、減輕污染危害或避免污染擴大、如何進行污染調查、選擇相關之整治技術等，可能並不十分清楚。因此，企業需要對其所屬員工進行教育訓練，增加其相關的知識。

經濟部工業局有感於業界對土壤及地下水污染預防與整治相關知識之需求，因此特彙編本手冊，供產業界人士參考。本手冊為「鋼鐵冶煉業土壤及地下水污染預防與整治技術手冊」，撰寫之內容主要為提供從事鋼鐵冶煉業相關人士閱讀，但對於手冊中之污染預防、調查技術、整治技術等相關資訊，因同樣適用

於其他各行業，亦可提供其他產業相關人士參考。本手冊先由鋼鐵冶鍊業之污染來源及污染物之特性說起，進而說明其污染預防、污染調查、整治技術、整治工程實施程序等。最後，本手冊亦以業者之角度，針對土污法之整治費徵收、土地移轉，主管機關公告指定事業之設立、停業、歇業時，應提出用地土壤檢測之規定，土壤及地下水污染場址列管作業程序說明，包括當事業被通知查證或改善、被列為控制或整治場址時，於適法狀況下之因應對策，以及對者對主管機關所做處分提出訴願或行政訴訟之程序等相關資訊，供產業界人士參考使用。

第二章 鋼鐵冶鍊業污染來源及污染特性

台灣地區之鋼鐵冶鍊業包括一貫作業煉鋼廠及電弧爐煉鋼廠兩大類，一貫作業煉鋼廠是以鐵礦砂、煤炭及石料為主要原料，經高爐及轉爐冶煉鑄造成為鋼胚，以供給中游產業進行軋延及加工後生產各類鋼品供下游產業使用；電弧爐煉鋼廠則是以國內回收之廢鐵、廢鋼或是進口之廢鋼料為原料經電弧爐冶煉鑄成鋼胚，其中部分供給中游產業，部分加工後提供下游產業使用，因此電弧爐煉鋼業也可視為廢鐵、廢鋼之資源再生產業，其廢鐵、廢鋼來源以拆船廢鋼、汽車廢鋼、壓鑄廢鋼及民間廢鋼為主，一般未經任何前處理直接入爐熔煉，所以電弧爐煉鋼製程之原料品質較為複雜。本章將針對上述兩大類之鋼鐵冶煉廠之行業製程特性、廢水、廢棄物及其他污染來源、污染物特性及污染傳輸方式等，說明如下。

2.1 行業製程特性

依據中華民國行業標準分類，鋼鐵冶鍊業之定義為凡從事礦砂之冶鍊以生產生鐵、合金鐵及直接還原鐵(如海綿鐵、熱鐵塊)，或再以生鐵、直接還原鐵或廢鋼精鍊成碳素鋼、合金鋼等行業均屬之。本節僅就鋼鐵冶鍊業之冶煉方式粗分為兩大類，其一為以鐵礦砂為主要鐵份來源之一次煉鋼製程，使用之冶煉設備為高爐及轉爐，亦即是一貫作業煉鋼廠之製程；其二為以廢鐵、廢鋼為主要鐵份來源之二次煉鋼製程，使用之冶煉設備為電弧爐配合精煉爐，亦即是電弧爐煉鋼廠之製程。

2.1.1 一貫作業煉鋼廠製程特性

一貫作業煉鋼廠之鋼鐵生產，一般包括有原料貯存輸送、煉焦、燒結、煉鐵、煉鋼、連續鑄造、軋鋼等一貫化作業，生產作業流程先由鐵礦砂經燒結製成燒結礦，煤碳經煉焦製成焦碳，再飼入高爐煉製鐵水，鐵水經脫硫後再送轉爐煉製成鋼液，鋼液經連續鑄造設備製成大小鋼胚、扁鋼胚，分別送至棒材工廠、線材工廠、鋼板工廠、熱軋工廠、型鋼工廠精製成各式鋼品，一貫作業煉鋼廠之生產流程如圖 2-1 所示，主要包括煉鐵、煉鋼、軋鋼等主要程序，所謂的鋼和鐵都是以鐵元素為主要成分，其中含碳量有所差異，通常含碳量 2% 以上的稱為「生鐵」，低於此數值的稱為「鋼」。此外，軋鋼製程概可分為冷軋及熱軋兩大類，通常會伴隨著鋼板之表面處理製程，這些表面處理製程包括鍍錫、鍍鋅、鍍錫鉛、鍍鉻之生產線或是其他有機塗料。茲將此一貫作業煉鋼製造程序之製程特性說明如下：

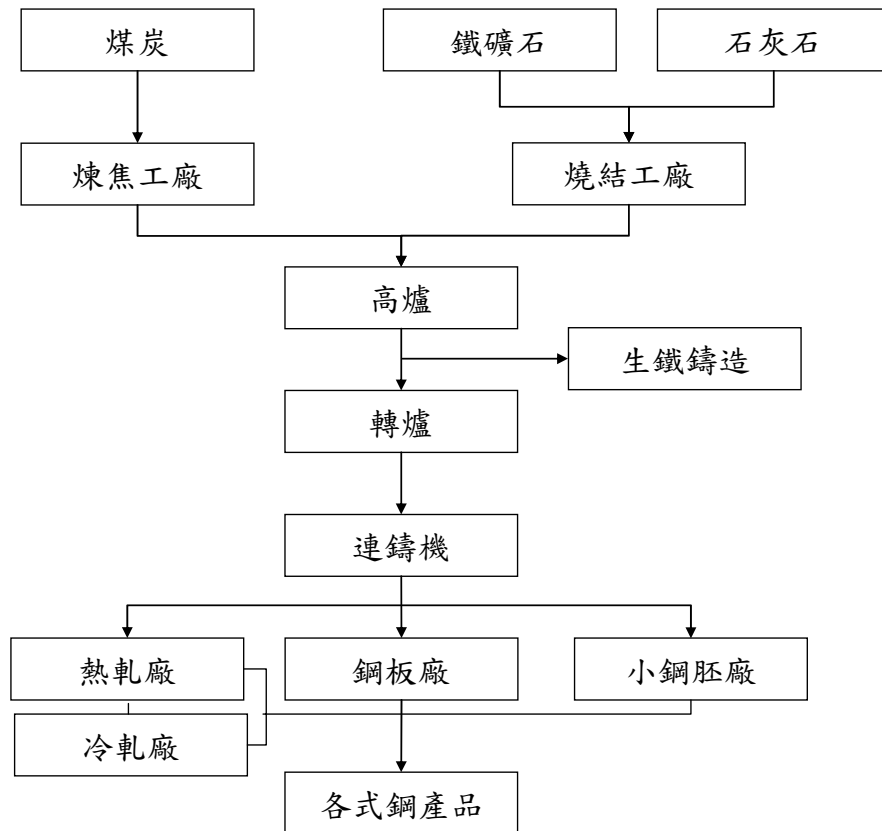


圖 2-1 一貫作業煉鋼廠生產流程

一、原料貯存及輸送

煉製鋼鐵所需的原料可分為四大類：第一類是含有鐵質元素的礦石原料，第二類是煤和焦炭，第三類為冶煉過程中以產生爐渣方式來分離雜質的助熔劑，第四類是各種的配合原料，如廢鋼、氧氣、合金鐵、造渣劑及製程回收料等。一貫作業煉鋼廠之原料均由卸料碼頭送至原料貯存區堆置，需料時再由料堆輸送至煉焦工廠及燒結工廠，主要的料堆包括鐵礦砂、煤碳、助熔劑(石灰石、蛇紋石或白雲石)，各種原料多採露天堆置，為防止逸散性空氣污染物，多半以料堆灑水方式來抑制。

二、煉焦製程

煉焦的目的為製作煉鐵時所需的還原劑及熱源，也就是焦炭。焦炭因具無煙、火力強、價廉等特性，所以成為煉鐵時最常被使用的熱源，它除了具有還原作用能使鐵之氧化物還原為金屬鐵外，還能供給熱能使還原之鐵熔化成鐵水而與爐渣(雜質)分離。

三、燒結製程

燒結工廠乃是以鐵礦砂、細焦碳、助熔劑(石灰石、蛇紋石或白雲石)及其他製程所產生之含鐵固雜料在高溫下進行燒結反應，藉由高溫將鐵礦砂與助熔劑結合，形成堅硬之塊狀燒結礦，以避免這些物料在高爐餵料時被強烈鼓風氣流吹至集塵設備，而細焦碳除可作為燒結過程所需之熱量外，也可進行初步之還原作用，以利後續之煉鐵程序。

四、煉鐵製程

高爐又稱為鼓風爐，為煉鐵（生鐵）設備之主體，其外部以鋼板包覆，內部則以耐火磚堆砌而成，爐之下部裝有熱空氣吹入口，以使熱空氣由下往上吹進入爐內之反應熔解區。進入高爐的原料有塊鐵礦、燒結礦、焦碳、石灰石及白雲石等原料，其中石灰石及白雲石是做為助熔劑將雜質以渣的型態分開，而氧化鐵則被焦炭還原成鐵水。

當爐床之爐渣及鐵水積存至相當量後，最後質輕之爐渣會浮於鐵水之上導至出渣口排出，而質重熔融之鐵水由流道流出後可直接送至煉鋼廠之轉爐作為原料或運往澆鑄廠之生鐵鑄造機澆注入鐵模內，鑄成塊狀生鐵(pig iron)。

五、煉鋼製程

由鐵礦石及燒結礦經高爐還原提煉所得之金屬鐵或生鐵。因在還原鐵礦石之同時其他添加物部分會被還原，易被還原的為鐵、磷，部分被還原的為矽、錳，添加物部分中被還原的為碳、硫等，此部分為生鐵成分；未被還原的有氧化鈣、氧化鎂及氧化鋁，以及部分未被還原的氧化矽及氧化錳，統稱為爐渣。

因此生鐵中含有 2%以上的碳以及熔融過程被還原的其他元素，如錳、矽、磷、硫等雜質，此部分金屬鐵缺乏韌性與可鍛造性，較不適合加工，僅適於鑄造物之製造(低熔點、流動性佳)，因此稱為鑄造用銑鐵。為供應更普遍的各種用途加工之需要，必須將所含雜質去除到某一限度以下，使它具有壓延性與鍛造性，此精煉步驟稱為煉鋼，所得產物稱為鋼鐵，茲將代表性之生鐵與鋼成分表示如表 2-1。

生鐵在適當脫硫後，進入轉爐中進行煉鋼程序，轉爐煉鋼程序是把氧氣吹入熔融的鐵水中，則由於熔融於鐵水中的各種雜質元素之氧化反應產生之氣化熱，吹煉過程不用再添加燃料，而可將鐵水中的雜質氧化成融渣去除製成鋼液。轉爐的構造是在鐵皮的內襯上耐火磚，做成西洋梨的形狀。為使爐體迴轉起見，具有迴轉軸，吹煉氣體由爐頂進入。

表 2-1 生鐵與鋼的成分比較

	生 鐵 (鑄 鐵)	鋼
C	2.5~4.8%	0.02~2.0%
Si	0.2~3.0	0.01~0.3
Mn	0.3~2.0	0.3~0.8
P	0.02~0.5	~0.05
S	0.01~0.1	~0.05

六、連續鑄造製程

鋼錠鑄造法的製程是將鋼液先澆鑄成鋼錠後，送入加熱爐加熱，然後再軋製成最後產品；而連續鑄造法則省去澆鑄鋼錠的步驟，直接將鋼液連續鑄造成鋼胚，經加熱爐加熱後，再軋製成產品。因此，連續鑄造法有高效率、低損耗及高品質的優點；但其缺點是設備費用高。生鐵水在脫完碳、矽、錳、磷及硫後成為鋼液，即可進入連鑄機進行大小鋼胚、扁鋼胚等之鑄造。連續鑄造之程序是將鋼液連續鑄入鋼液分配器內，其具有穩定流速及分配鋼液鑄道的功能。鋼液經底部流出口流入一上下開口之銅製鑄模內，鑄模外壁夾層有冷卻水流經其間，藉以帶走大量之熱量，促使模內的鋼液形成一凝固的殼層，此為一次冷卻。澆鑄前以模底口用的拉桿將模底封住，因此鋼液注入後並不會自行流出；當模內鋼液的凝殼層硬化到一定程度時，便利用鑄模下方的抽引滾筒將拉桿向下拉出，鑄塊也因此隨拉桿而被拉下。鑄塊與抽引滾筒間，設有引導滾筒裙用來引導鑄塊行進之方向；滾筒間設有數個噴水口，對鑄塊施以噴水作業，進行二次冷卻，因此鑄塊內還未凝固的鋼液，進行噴水冷卻後鑄塊完全凝固。抽引滾筒後方以油壓剪或焰切機裁切成所欲的長度；再經由輸送床、冷卻床送至軋鋼工廠，此種將鋼液連續鑄成鋼胚之方法即為連續鑄造法。

七、軋鋼製程

鋼具有延展性，在常溫受力時可伸長，亦可延展成薄片，但加熱至赤熱狀態下更易加工成所需要的形狀。鋼之塑性成形法有多種，主要的成形法有軋延、鍛造、擠出、抽伸和深沖等 5 種方法。

傳統的煉鋼廠，皆利用造塊法將鋼液澆注在鋼錠模內鑄成鋼錠 (ingot)。鋼錠重且斷面大，在煉鋼廠脫模後於紅熱狀態下(約 800°C)送進

均熱爐內加熱至軋製溫度後經開胚機製成各種不同尺寸的小鋼胚、大鋼胚或扁鋼胚。這些鋼胚再分送到條線軋延廠，鋼板軋延廠或鋼管軋延廠軋製為成品。若鋼錠斷面積較小者，可不經分塊軋延，直接送進軋延廠加工。

將鋼胚(billet, bloom, slab)通過 2 個轉動軋輥，受連續軋力而壓伸為長形，其產品謂之軋製鋼材。用鍛鏈或鍛軋機等加工成形者，謂之鍛鋼品。成品形狀複雜者，不易用軋製和鍛造法成形，須用鑄造法，謂之鑄鋼品。鋼之鑄造，係將熔融之鋼液澆注在砂模內而成形。因軋製法產量高，加工容易，平均成本低，故軋製鋼材佔全部鋼成品的 95%以上。

鋼的軋製分熱軋和冷軋兩種。所謂熱軋是指鋼胚送進軋延機軋製之前將其加熱至高溫；而冷軋是指被軋延之材料不預先加熱而在常溫下即送進軋延機軋製。鋼料被加熱至 800℃ 以上，則其塑性大，對變形的抵抗小，加工容易，一般都將鋼胚加熱到變態點以上。冷軋的優點是成品表面優良，尺寸精確且鋼材因加工硬化的效應而具有較大的強度。但冷軋的原料是熱軋成品；在冷軋時，並非將鋼胚在常溫下直接送進軋延機軋製，而是將鋼胚先經熱軋至一定尺寸後再經冷軋。

軋延機是用來軋鋼的設備。每組軋延機由軋輥、軸承、楔、輥架和動力輸送系統組合而成。軋輥通常作水平架設，亦有作垂直架設。每組軋延機所用的軋輥數目視軋製成品的種類而有不同，並且軋輥的轉動方向有固定轉向和可逆轉向兩種。鋼之軋製係將鋼胚通過 2 個轉向相反、圓周速度相等之軋輥間，因軋輥之壓擠作用所生的壓力和軋輥與鋼胚接觸面間之摩擦作用所形成的表面剪應力而使鋼胚厚度裁減及寬度與長度增加；寬度的增加量較厚度的裁減量為小。軋製鋼板時，至一定厚度後，幾無寬度的增加，厚度的裁減全變成長度的延伸。鋼胚由於軋製致斷面縮減，使長度伸長。經多道軋延而達所需之斷面形狀和大小。

軋輥直徑減小，軋輥與鋼胚之接觸面積減少，則其間之摩擦阻力變小，所以在同樣加工量之下，小軋輥較大軋輥所須之動力為小，四重軋延機工作輥直徑較小即為此理。小軋輥另一優點為在同樣加工量下，其寬度增加量小，所以成品尺寸精度高。

2.1.2 電弧爐煉鋼廠製程特性

電弧爐煉鋼在國內以成品材質分類，概可分為碳鋼及合金鋼(主要為不銹鋼)兩大類。以成品生產量而言，台灣之電弧煉鋼業以生產碳鋼為主(不銹鋼生產量約為碳鋼之 10~20%)。

電弧爐之爐殼係圓筒形或角形，電極有 3 個，由爐頂插入，電極與爐內材料間發生電弧；同時，電流通過爐內材料，因電阻而轉變成熱能。藉電弧熱及電阻熱而使爐內材料加熱，此法中，電弧升降之操作容易鋼液溫度調整方便，熱效率高，耐火材料壽命長。

電弧爐煉鋼廠之鋼鐵生產，係利用在高電壓情況下，電流通過人造石墨電極與廢鋼時，產生高溫電弧而熔融廢鋼，以達成冶煉鋼鐵之目的。為符合產品規格之要求，於電弧爐冶煉過程中，可加入少量矽鐵、錳鐵、焦炭、生石灰及脫硫劑等副原料，並通入純氧助燃。電弧爐煉鋼均為批次式作業，通常每一批次時間約在 1 小時以內，冶煉過程可依其化學反應分成 3 個階段，分別為熔解期、氧化期、還原期，出鋼時由盛鋼桶轉運至連續鑄造機，碳鋼廠通常精煉步驟也在電爐中完成，或是在盛鋼桶中進行精煉；而不銹鋼廠通常還會再經過轉爐精煉，進一步調整及精煉至符合產品規格之成分，或是再進一步由真空精煉爐進行脫碳，再進入連續鑄造機。典型之碳鋼電弧爐煉鋼流程如圖 2-2 所示，而不銹鋼電弧爐煉鋼廠流程如圖 2-3 所示。茲將一般電弧爐煉鋼製造程序之製程特性說明如下：

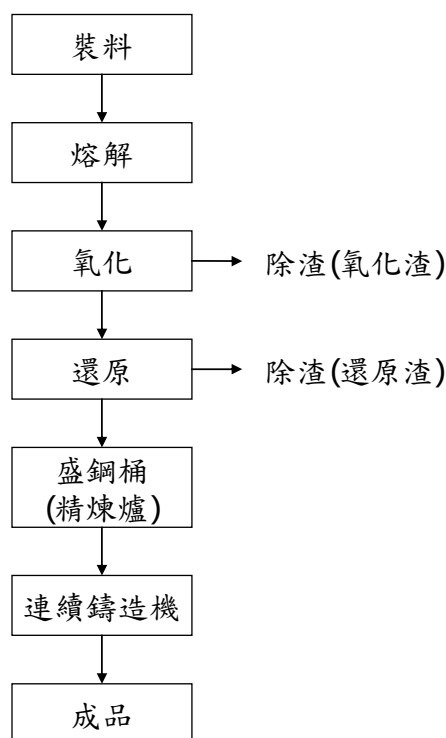


圖 2-2 碳鋼電弧爐煉鋼製造流程

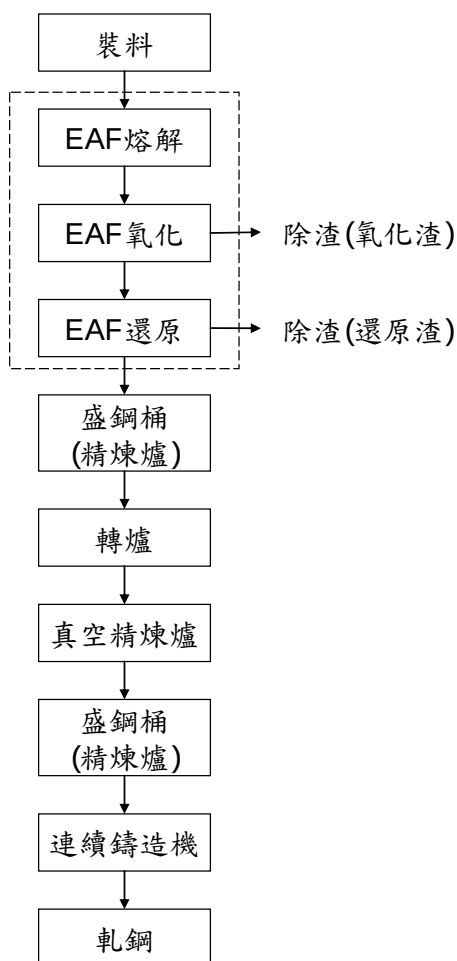


圖 2-3 不鏽鋼製造流程

一、裝料

原料經初步之分類、秤重後，以天車操作由爐頂加料，將廢鋼裝入爐內。為求縮短煉鋼時間，廢鋼原料應預先加以切細，使爐內廢鋼密度加大，減少裝料次數。裝料要領為含碳較高者應先裝入，因其熔點低，可提早熔解成鋼液池以保護爐床。

二、熔融期

當廢鋼裝入爐內後，即可開始通電。此時由於電極與廢鋼間發生電弧極近爐蓋，為避免爐蓋灼傷過劇，故次級電壓不應過大，應採用中等電壓，當電極鑽入廢鋼中之深度與電極直徑相等時，即可改換最高電壓，輸入最大電力，加速廢鋼熔融，以迄完全熔落。此時溫度已達 1,550℃ 以上。

三、氧化期

當廢鋼熔落後，即加入氧化劑，以使熔鋼內之雜質氧化與加入之熔劑(如石灰)結成複雜的鹽類爐渣而與熔鋼分離。氧化精煉期中，如熔鋼含磷高，應在較低溫度下進行脫磷作用，所生成高磷爐渣應分離之，以避免復磷。氧化精煉兼有調整鋼液含碳量作用，通常係將碳氧化脫除至略低於目標成分。脫碳作業溫度愈高愈快速。氧化精煉尚有一脫硫作用，此種反應必須在高溫始能進行。

四、除渣

當氧化精煉完成後，所生成之爐渣視渣量多寡而決定分進扒除與否，不扒除渣即屬單渣法，扒渣者即謂雙渣法(即為本階段之氧化渣及還原期後之還原渣)，扒渣時以細鋼棒前釘一圓木，伸入爐內將爐渣扒出。扒渣前溫度較高，否則不易進行還原作業。本階段所扒的爐渣為電爐之氧化渣，而還原期之出渣，則是電爐廠之還原渣，如後續接盛鋼桶之精煉者，則會有盛鋼桶之精煉爐渣產生，如後續接有精煉爐者，則會另有精煉爐渣產生。

五、還原期

投入石灰、焦炭粉、螢石及少量錳鐵於爐內進行還原精煉，以去除熔鋼含氧及非金屬之介在物，同時也具有脫硫作用。此時視熔鋼成分及鋼種進行造渣。如含硫量高，且計劃生產的是中碳以上鋼種時，就應造碳化鈣爐渣，其要領為加較多量的焦炭與石灰混合，投入爐內，在高溫下加以攪拌而使之快速形成碳化鈣爐渣。當爐內脫氧作用達某一程度而溫度也適於出鋼時，即應投入矽鐵或鋁條攪拌而出鋼。

六、精煉爐

精煉通常屬於合金鋼廠(特別是不銹鋼煉廠)之程序之一，國內之其他碳鋼煉鋼廠並精煉爐，而不銹鋼廠之精煉通常利用轉爐進行，如需進一步精煉，也可以再利用真空精煉爐冶煉，而此製程目的主要為調整鋼液之品質，可加入特定規範之合金鋼，使鋼液之品質符合計劃生產成品之規範。

七、連續鑄造製程

電弧爐出鋼時由盛鋼桶轉接送入連鑄機進行鑄造。連續鑄造之程序是將鋼液連續鑄入鋼液分配器內，其具有穩定流速及分配鋼液鑄道的功能。鋼液經底部流出口流入一上下開口之銅製鑄模內，鑄模外壁夾層有

冷卻水流經其間，藉以帶走大量之熱量，促使模內的鋼液形成一凝固的殼層，此為一次冷卻。澆鑄前以模底口用的拉桿將模底封住，因此鋼液注入後並不會自行流出；當模內鋼液的凝殼層硬化到一定程度時，利用鑄模下方的抽引滾筒將拉桿向下拉出，鑄塊隨拉桿而拉下。鑄塊與抽引滾筒間，設有引導滾筒裙用來引導鑄塊行進之方向；滾筒間設有數個噴水口，對鑄塊施以噴水作業，進行二次冷卻，因此鑄塊內還未凝固的鋼液，進行噴水冷卻使鑄塊完全凝固。抽引滾筒後方以油壓剪或焰切機裁切成所需長度，成為成品外售。

八、軋鋼製程

國內電弧爐不銹鋼廠中，在連續鑄造製程後，設有軋鋼製程，不銹鋼鋼胚經加熱爐加熱後，經往復式軋延機軋延後，由盤捲機捲成鋼捲，此為熱軋製程，熱軋後之鋼捲經退火、酸洗後，在常溫下以冷軋機軋延成較薄之冷軋鋼片，並再經電解、酸洗、退火至再結晶溫度以調整鋼品材質，最後經調質軋延及冷軋精整成為冷軋成品。而且不銹鋼製造通常配置有表面酸洗製程，使用氫氟酸及硝酸做為酸洗溶液。

2.2 污染來源及污染特性

2.2.1 廢水來源及污染特性

一、一貫作業煉鋼廠

一貫作業煉鋼廠之製程區，包括原料貯存區、煉鐵區(含煉焦及燒結)、煉鋼區、條鋼工場、線材工場、鋼板工場、熱軋工場、冷軋工場、公用設施區(含動力工場及氧氣工場)等，各製程區均須用水作為冷卻用途，尚有其他用途包括鍋爐用水、製程用水、洗滌用水、生活用水等類。一貫作業鋼廠之冷卻用水量，依使用方法可分為直接冷卻水系統、間接冷卻水系統、閉路循環水系統、洗塵水冷卻系統及消防水系統等。一貫作業煉鋼廠之用水大都採用循環再利用方式，一般維持 90%以上之用水回收率，廠內補充用水量以公用設施區(包括動力工場、氧氣工場、空壓站)及煉鐵區(包括煉焦工場、燒結工場、高爐工場)較大，其次為煉鋼區。一貫作業煉鋼廠製程產生之廢水性質概可分為 3 種，為間接冷卻水、工業廢水、生化、煉焦及生活廢水，茲分別說明廢水之來源及其污染特性。

(一) 間接冷卻水

間接冷卻水是指生產製程中，為排除多餘的熱量，以維持生產

設備在正常溫度下的用水。一貫作業鋼廠之間接冷卻水大多使用在煉鐵、煉鋼及軋鋼設備之冷卻，用水量大、污染性低，其排放水水質尚能直接做為水質要求較低之次級製程用或經由適當處理後，再使用於其他製程中。

冷卻用水經由重覆之循環使用，循環水質中離子濃度自然產生濃縮之現象，且循環水溫亦會逐步提高，為避免離子濃縮之濃度及循環水溫超過化學溶解度上限，則必須藉由排放部分循環濃縮水補充新鮮水及添加除蝕、防垢抑制劑，以維持系統之正常運作。

(二) 工業廢水

製程所產生之工業廢水，包括高爐、轉爐洗塵及軋鋼製程的廢水，主要成分為氧化鐵、氧化鋅、氧化鈣、氧化鎂等粒狀固體物質。其他製程之冷卻水、洗滌水、金屬表面沖洗水，主要成分為鐵、鋅、鉻、溶解性離子、硬度、鹼度、懸浮固體及油脂。

(三) 生化廢水

一貫鋼廠之生化廢水來源主要為煉焦副產品工場的煉焦廢水及生活污水。這兩股廢水之主要成分為有機物、酚類化合物、氰酸鹽、生化需氧量、懸浮固體及氨氮等。

二、電弧爐煉鋼廠

電弧爐煉鋼廠之製程，包括原料貯存、電弧爐、精煉爐、連續鑄造機、軋鋼等單元，均需不同水量之用水，主要用途為冷卻採用循環利用方式，故廢水產生量不大。電弧爐煉鋼廠之直接或間接冷卻水大多用於煉鋼、連鑄機及軋鋼之冷卻，具有循環水量大、消耗量少、污染性低之特性，可經由適當處理後自然重覆再利用，冷卻水經由重覆之循環利用，循環水質中離子濃度自然產生濃縮之現象，且循環水溫亦會逐步提高，為避免離子濃縮之濃度及循環水溫超過化學溶解度上限，則必須藉由排放部分循環濃縮水補充新鮮水及添加防蝕、防垢抑制劑，以維持系統之正常運作。

國內電弧爐煉鋼廠之集塵設備大多採用乾式袋式集塵設備，作為空氣污染防制用途，所以沒有爐塵之洗塵水產生。部分電弧爐煉鋼廠設有軋鋼產線及金屬表面酸洗線，則會有廢酸及相關洗滌水產生。至於其他廢水來源為員工的生活污水，主要的污染物質為有機物、生化需氧量及氨氮等。

2.2.1 廢棄物來源及污染特性

一、一貫作業煉鋼廠

一貫作業煉鋼廠之製程複雜而龐大，製程涵蓋原料貯存區、煉鐵區(含煉焦及燒結)、煉鋼區、鑄造區、條鋼工場、線材工場、鋼板工場、熱軋工場、冷軋工場、公用設施區(含動力工場及氧氣工場)等，各製程區均會產生不同數量及性質之事業廢棄物。依特性可分成 6 大類：

- (一) 爐石與耐火材：為高轉爐及各高溫爐產生。
- (二) 礦泥與污泥：為廢水處理場或濕式洗塵所產生。
- (三) 粉塵：多為集塵設備所收集之塵灰。
- (四) 廢油：為機械潤滑及油壓控制系統所產生。
- (五) 鐵銹皮與鐵屑：軋延、鑄造或切割所產生。
- (六) 雜物：包括各項生活及設備維護檢修所產生。

以下茲將說明一貫作業鋼廠之各主要製程區之廢棄物產出單元、成分、及污染特性：

(一) 煉鐵區

高爐鍊鐵係將鐵礦石、燒結礦、焦炭和助熔劑等加入高爐以煉製鐵水，同時產生爐渣。爐渣乃是以氧化矽和氧化鋁為主要成分的鐵礦及焦炭的灰分和助熔劑中的氧化鈣、氧化鎂等成分反應而成的。在爐內溫度 1,500°C 以上的環境中，鐵水和爐渣皆呈熔融狀態，在出鐵水時爐渣亦同時流出，利用鐵水和爐渣兩者比重的差異而分離。爐渣為高爐排出後冷卻所得之固體物，通常稱之高爐石，由於高爐石冷卻方式不同，可分為氣冷高爐石與水淬高爐石兩種。氣冷高爐石係將高溫爐渣於大氣中噴水緩緩冷卻所得之塊狀物。水淬高爐石係高溫爐渣由爐內流出時，以高壓冷却水急速冷卻所得之粒狀物。由於資源再利用價值及市場趨勢，氣冷方式已逐漸被水淬取代。高爐爐渣是一貫作業鋼廠產量最大之副產物，其主要成分為鈣、矽、鋁、鎂等氧化物，重金屬含量極少，這些爐渣對環境之污染衝擊不大，目前已成為一貫作業鋼廠之主要副產品，大量用於水泥替代料。高爐爐塵經水洗後存在於高爐洗塵水中，經固液分離後成為高爐礦泥，這些礦泥大部分送水泥廠利用以取代鐵渣原料；少部分可以回燒結工廠取代燒結礦，這些礦泥含鐵量高，亦含有少量之鋅成分。

煉焦工場會產生煤屑或焦炭屑或非有害之集塵灰或其混合物，這些焦炭屑及集塵灰均屬無害性廢棄物。煉焦工場所產生有害廢棄物為傾析器之渣，這些渣含苯類有機物質，若未經適當處理利用，對於土壤及地下水之環境負荷較重，目前全由煉焦工場回收利用。

燒結工場產之廢棄物包括有害及非有害性集塵灰或其混合物，這些集塵灰成分多是氧化鐵、氧化鈣、氧化矽及氧化鋁之混合物，污染潛勢不大，目前燒結集塵灰全數由煉鐵製程回收利用。一貫作業鋼廠之煉鐵製程廢棄物來源、成分、特性與清理流向，詳如表 2-2 所示。

表 2-2 煉鐵製程之廢棄物來源、成分、特性與清理流向

廢棄物 ⁽¹⁾ 或再生資源 ⁽²⁾ 類別	來源	成分、特性	清理流向
煉焦之傾析器渣 ⁽¹⁾	煤化學工場	- 有害 - 液態	100%廠內回收
非有害廢集塵灰或其混合物 ⁽¹⁾	淬火塔、燒結製程、高轉爐之空氣污染防制設備收集	無害	100%廠內回收
水淬高爐石(渣) ⁽²⁾	高爐	- 無害 - 高爐爐渣，主要成分為 SiO₂、Al₂O₃、CaO 等	100%廠外利用
氣冷高爐石(石)	高爐	無害	廠內或廠外利用
高爐礦泥 ⁽²⁾	高爐濕式洗塵系統	無害	1.廠內回收 2.廠外利用

(二) 煉鋼區

煉鋼的原料為高爐產出的鐵水，因其含硫量偏高，因此在飼入轉爐煉鋼前同時加入先經過脫硫處理，接著讓鐵水的成分及溫度均勻，同時加入處理過後的煉鋼副原料(廢鋼、合金鐵、造渣劑)，並進行吹氧作業，於高溫狀態下，可去除碳、矽、錳、磷、硫等不純物，由於這些元素與氧的親和力比鐵與氧的親和力為大，致能優先

氧化成氧化物；隨後加入助熔劑與此等氧化物結合成爐渣，再利用比重不同而能有效分離爐渣，而鐵水中之碳與氧反應成為一氧化碳或二氧化碳氣體。一氧化碳濃度高的部分，由排氣系統回收做為燃氣，濃度低的則由氣閘排燒至大氣。因此在煉鋼製程中會產生脫硫渣、脫矽渣、脫磷渣及脫碳渣(轉爐渣)等副產物，這些爐渣成分主要為氧化鈣、二氧化矽、三氧化二鋁、氧化鎂、氧化錳、鐵或氧化鐵，其次為硫、磷等。其中轉爐爐渣之酸鹼值在 11~12 左右，偏鹼性，且其中含有比率不均的自由態氧化鈣、氧化鎂及穩定之三氧化二鋁，在後續再利用作為土木工程回填材料時，須注意其膨脹性及酸鹼值高之特性。作好工程施工規範及防止地面水體受高酸鹼值之影響。另外，轉爐煉鋼過程同時會產生轉爐塵，經水洗後成為轉爐洗塵水，在調稠固液分離及脫水後成為轉爐礦泥，氧化鐵成分高及少部分之氧化鋅，可回收燒結工場取代部分燒結礦。

(三) 連鑄及軋鋼區

這些製程區通常包括加熱、軋延及退火單元，於加熱爐單元中將因燃燒產生油灰等一般性塵灰，軋延、冷卻過程中會產生之鐵屑及銹皮等副產物。其中塵灰多半屬矽鋁氧化物及未燃碳，對土壤及地下水之污染潛勢不大。鐵屑及銹皮本身含有一些油份，由於富含鐵成分及油脂，經妥善處理可以回收利用。

(四) 鋼材表面處理

將金屬料或塗料被覆在鋼板上，得使鋼板耐蝕、耐酸、耐鹼性增強，鋼板表面平滑美觀增加用途。此類鋼板可分為鍍錫鋼板、鍍鋅鋼板、鍍鉻鋼板、鍍錫鉛鋼板、鍍鋁鋼板及有機塗料鋼板等。鍍錫鐵板俗稱馬口鋼板，是將成捲冷軋鋼板通過電解槽，將錫鍍在鋼板表面，再經過剪裁成適當的尺寸，即成電鍍馬口鐵板。若將剪裁好的冷軋鋼板浸入熔融狀態的錫中，如此製造的馬口鐵板就是熱浸馬口鐵板。鍍鋅鐵板俗稱白鐵皮，是將成捲的熱軋或冷軋鋼板，通過熔融的鋅浴槽中，使鋅附著在鋼板表面，即成鍍鋅鋼板。鍍鉻鋼板係以電鍍將鉻鍍在冷軋鋼板上。如一貫作業鋼廠有上述之表面處理生產流程，則自然會產生含這些重金屬之灰渣或礦泥等廢棄物，特別是含鋅之灰渣及礦泥在很多表面金屬處理場均會產出，以及上述製程操作所衍生之含鋅、鉻廢液產生。所以此區之廢棄物及廢液若未妥善處理易有土壤及地下水污染潛勢，必須妥善清除及處理。

(五) 公用設施系統

一貫作業鋼廠之動力工場、氧氣工場及資源回收場(焚化)操作過程中，會產生性質不同的灰渣類廢棄物。如動力工場燃煤會產出煤灰，主要成分是氧化矽、氧化鋁以及少量未燃碳。多數可以拌合做為混凝土助劑、保溫材等。對土壤及地下水之污染潛勢不大。資源回收場(焚化爐)產出灰渣性質則因進料性質之不同而有很大之差異，其中飛灰常含有重金屬或微量戴奧辛，因此須妥善清除及處理，以避免對土壤及地下水之污染。

(六) 其他廢棄物

一貫作業鋼廠包含許多高溫製程，如高爐、轉爐、連續鑄造及軋鋼之加熱爐...等，都必須使用耐火磚及鑄造於零件使用之鑄砂，於適當時間必須進行爐體汰換耐火材或鑄砂，此等廢棄物以矽鋁氧化物為主，混雜一些鐵分及少量之重金屬，產量不大，但經適當分類、處理可以有效再利用並避免對土壤及地下水之污染。

二、電弧爐煉鋼廠

電弧爐煉鋼廠之製程，包括原料貯存、電弧爐、精煉爐、連續鑄造、軋鋼等單元，各操作單元均會產生廢棄物，主要包括爐渣、集塵灰、鐵屑及銹皮、廢耐火磚、廢鑄砂、廢酸及廢油等。其中以爐渣及集塵灰之發生量佔大宗，是電弧爐鋼廠較不易處理之廢棄物。碳鋼及不銹鋼電弧爐煉鋼廠製程之廢棄物來源、成分、特性與清理流向，分列如表 2-3 及表 2-4 所示。以下就碳鋼電爐廠及不銹鋼電爐廠分別說明其廢棄物之產生及污染特性：

(一) 碳鋼電爐廠

碳鋼電爐廠之爐渣量約為鋼液產量之 7~13% 左右，而盛鋼桶之爐渣量約僅為鋼廠之 1~2%，廢耐火磚之產生量約為鋼液產量之 1% 左右。這些爐渣又分氧化渣及還原渣，其化學成分都以氧化鐵、氧化鈣、氧化鎂、二氧化矽、三氧化二鋁及氧化錳為主。一般而言，氧化渣中氧化鈣含量相對比較低，氧化鐵含量會比較高，而還原渣則相反。還原渣之成分與水泥成分相近，可以處理成為水泥替代料或作為回填土方，但因含有矽酸二鈣、游離氧化鎂、游離氧化鈣等成分，含有體積不穩定潛在因素，且酸鹼值 12 左右，利用時要注意對地下水地面水體之衝擊。廢耐火磚之產量較少，且其成分與爐

渣相近，主要是二氧化矽及三氧化二鋁，通常可與爐渣一併清除處理，對土壤及地下水之污染性較小。

碳鋼電爐廠之集塵灰產量約為鋼液產量之 1~2% 之間，這些集塵灰主要含有氧化鋅、氧化鐵、氧化鉛及其他金屬氧化物，集塵灰於廠內採用濾袋式集塵設備收集，經造粒機造粒，裝入太空包中，以卡車清運至煉鋼集塵灰資源化回收廠；或是將集塵灰送入集塵灰貯存桶槽中，再以槽車密封運送至煉鋼集塵灰資源化回收廠處理。經造粒後以開放式卡車清運易產生逸散性的污染，對土壤及地下水之污染潛勢較高些，一般以密封貯槽及密閉槽車清運是必要的，以免對土壤及地下水造成污染。

表 2-3 碳鋼電弧爐煉鋼製程之廢棄物來源、成分、特性與清理流向

廢棄物 ⁽¹⁾ ／副產物 ⁽²⁾	來源	成分、特性	清理流向
電爐集塵灰、污泥 ⁽¹⁾	電弧爐之空氣污染防制設備收集之重金屬氧化物(鋅、鉛、鎘等)	●集塵灰-微粒 ●有害 (含 Pb、Zn)	委託或自行清除、廠外處理
一般性集塵灰 ⁽¹⁾	精煉爐或其他加熱爐之空氣污染防制設備收集之集塵灰	●集塵灰-微粒 ●無害	委託或自行清除、廠外回收(通常與電爐集塵灰及污泥合併管理)
電弧爐煉鋼爐渣(石) ⁽¹⁾	電弧爐煉鋼程序產生	●無害 ●硬度高 ●爐石，主要成分為 SiO₂、CaO	廠外回收
廢耐火材 ⁽¹⁾	電弧爐、盛鋼桶或精煉爐定期維修產生	●無害 ●硬度高	委託或自行清除、廠外處理或再利用
重油灰渣 ⁽¹⁾	盛鋼桶預熱或其他加熱爐產生	●無害	委託或自行清除、廠外處理
廢鐵 ⁽²⁾	鋼胚冷卻產生之氧化鐵及報廢品等	●無害	委託再利用或自行再利用

表 2-4 不銹鋼電弧爐煉鋼製程之廢棄物來源、成分、特性與清理流向

廢棄物 ⁽¹⁾ ／副產物 ⁽²⁾	來源	成分、特性	清理流向
電爐之集塵灰及污泥 ⁽¹⁾	電弧爐之空氣污染防制設備收集之重金屬氧化物	• 集塵灰-微粒 • 有害(鋅、鉛、鎘、鎳、鉻等)	委託或自行清除、廠外處理
電弧爐煉鋼爐渣(石) ⁽¹⁾	電弧爐煉鋼程序產生之氧化及還原渣	• 無害 • 硬度高	廠外回收
非有害廢集塵灰或其混合物 ⁽¹⁾	轉爐及精煉爐集塵灰	• 集塵灰-微粒 • 無害	委託或自行清除、廠外回收(通常與電爐煉鋼過程污染控制之集塵灰及污泥合併管理)
金屬精煉爐石(渣)或礦渣混合物 ⁽¹⁾	轉爐、精煉爐製程產生之爐渣	• 無害 • 硬度高	委託或自行清除、廠外處理
廢耐火材 ⁽¹⁾	電弧爐、盛鋼桶、轉爐及精煉爐定期維修產生	• 無害 • 硬度高	委託或自行清除、廠外處理或再利用
重油灰渣 ⁽¹⁾	盛鋼桶預熱或其他加熱爐產生	• 無害	委託或自行清除、廠外處理
廢鐵 ⁽²⁾	鋼液精煉、鋼胚冷卻產生之氧化鐵及報廢品等	• 無害	回收

(二) 不銹鋼電爐廠

不銹鋼電爐廠之爐渣產量約為鋼液產量之 10~15% 左右，而轉爐之爐渣量約為鋼液之 5~10%，廢耐火材之產量約僅為鋼液產量之 1~2% 左右。這些爐渣又分氧化渣或還原渣，其化學成分都以氧化鐵、氧化鈣、氧化鎂、二氧化矽、三氧化二鋁及氧化錳為主。一般而言，氧化渣中氧化鈣含量相對較低，氧化鐵含量相對較高，而還原渣則相反。還原渣之成分與水泥成分相近，可以處理廠做為水泥替代料，或作為回填土方，但因含有矽酸二鈣、游離氧化鎂、游離氧化鈣等成分，會有體積不穩定潛在因素，且酸鹼值 12 左右，利用時要注意對地下水地面水體衝擊。此外，不銹鋼電爐廠之爐渣中含有氧化鉻，因此爐渣做為填地材料應注意鉻含量對土壤及地下水污染衝擊。廢耐火磚之產量較少，且其成分與爐渣相近，主要是二氧化矽及三氧化二鋁，通常與爐渣一併清除處理，對土壤及地下水之污染性較小。

不銹鋼電爐廠之集塵灰產量約為鋼液產量之 2~3% 之間，這些集塵灰主要含有氧化鋅、氧化鐵、氧化鉛、氧化鉻、氧化鎳及其他金屬氧化物，集塵灰於廠內採用濾袋式集塵設備收集，經造粒機造粒，裝入太空包中，以卡車清運至煉鋼集塵灰資源化回收廠處理。但造粒後以開放式卡車清運，因此產生逸散性的污染，對土壤及地下水之污染潛勢較高些。因此有於廠內設置集塵灰資源化回收設施，將其中之鎳、鉻、鐵回收於合金鋼中，鉛、鋅回收於二次集塵灰中，而所產生之氧化渣及還原渣可如電爐廠之爐渣再利用。此外，不銹鋼廠尚有含鉻污泥及鐵屑、鐵銹等廢棄物產生，同理可以於回收處理設施中再生利用，但須注意廢棄物貯存運輸及利用時對土壤及地下水之污染考量。

2.2.3 其他污染源及特性

鋼鐵冶鍊業之土壤及地下水污染源，除了廢水及廢棄物之外，還包括空氣污染源，茲說明如下：

一貫作業煉鋼廠及電爐煉鋼廠之製程均使用高溫爐熔煉鐵金屬，在加熱熔煉過程中，往往產生很多金屬及無機物煙塵，這些煙塵經空氣污染防制設備捕集及冷卻並氧化成氧化物，然後被收集在集塵設備中，但是仍有極少部分之煙塵從污染防制設備中逸散至大氣中，經由氣流擴散沉降於煉鋼廠附近之土地上，可能影響土壤及地下水品質。而這些逸散性之粒狀污染物，在一貫作業鋼廠及碳鋼電爐廠中，其成分通常是氧化鐵、氧化鈣、氧化鎂、氧化鋁、氧化矽、氧化鋅及氧化鉛為主。而不銹鋼電爐廠則除了氧化鐵、氧化鈣、氧化鎂、氧化鋁、氧化矽、氧化鋅及氧化鉛之外，還有氧化鉻及氧化鎳等成分，其中金屬氧化物逸散落地後，可能影響工廠附近之土壤及地下水品質。此外，這些金屬煙塵中還有其他微量之重金屬污染物，如砷、鎘、汞等，其濃度雖然極低，但會在煙塵中累積，長期累積可能影響廠區附近土壤及地下水之污染。

所以鋼鐵冶煉廠對於其廠內空氣污染防制系統，應隨時監測其粒狀污染物排放情形，使空氣污染防制系統保持正常穩定狀態，因為一旦異常致這些重金屬氧化物煙塵逸散至工廠附近，清理工作就很費時費力。

2.3 污染物類型及在環境中的傳輸

一、污染物類型

鋼鐵冶煉業之主要原料為鐵礦砂、廢鐵、廢鋼、焦炭、石灰石等，這些原料在高溫冶煉過程中，將產生鐵及碳、鈣、鎂、矽之氧化物等物質；廢鐵原料表面通常伴有金屬表面防銹蝕處理之金屬物質，一般為鋅、鉛、鉻、錫、鎳及其氧化物；廢鋼原料則有鎳、鉻、銅、鈮、鉬等。

冶煉單元產生之廢棄物主要為爐渣、集塵灰或污泥，鑄造及軋鋼單元則有加熱爐灰渣、鐵屑及銹皮、廢油等，金屬表面處理之酸洗、鍍鋅、鍍鉻單元會產生廢酸、重金屬污泥等。爐渣成分以鈣、鎂、矽、鋁及其氧化物為主，集塵灰則以鐵、鉛、鋅、鎳及其氧化物為主(不銹鋼單元尚有鎳、鉻)，金屬表面處理產生之廢酸及污泥，成分則以鐵、鉛、鋅、鉻及其氧化物為主。

鋼鐵冶煉業除一貫作業鋼廠煉焦工場、燒結工場具有有機化合物污染之虞外，其餘製程產出之污染物以重金屬及其氧化物為主，而這些重金屬污染物以鉛、鋅、鎳、鉻對土壤及地下水之污染衝擊較為顯著。

(一) 鉻

三價鉻對哺乳動物之毒性低，溶解態之六價鉻則具可能致癌性。鉻中毒會引起嘔吐、下痢、腹痛、尿毒症等。鉻大都以三價及六價形態存在於環境中，六價鉻酸分子會因環境酸鹼性的不同而改變其形態，也會經由氧化還原反應轉變價數，甚至會與其它重金屬陽離子形成不易溶解的鹽類，如鉻酸鉛等。在酸性條件下，若存在還原性物質，如有機物、二價鐵、硫化氫，六價鉻會發生還原作用，產生三價鉻並發生吸附反應，或形成 $\text{Cr}(\text{OH})_3$ 沉澱，甚至在錳氧化物存在下可能使三價鉻氧化為六價鉻，這種活潑的化性雖然有助於控制毒性強的六價鉻，但若管理不善則會隱藏著危機。

(二) 鎳

鎳對於哺乳動物的毒性低，因此生長在嚴重鎳污染環境之作物，經人體食用後，很少呈嚴重毒害情形，鎳離子對人體的毒性危害主要是會造成細胞組織壞死，引起過敏性皮膚炎。

(三) 鋅

植物對鋅有吸收性，雖然鋅對植物的毒性低，但在吸收累積下，對於食用之人畜仍具有危害性，雖然鋅為人體需補充之微量物

質。鋅非致癌物，但攝入過量則可能傷害人體造血及免疫系統。

(四) 鉛

土壤中高濃度的鉛對作物並無毒害，但濃度過高時則會抑制光合作用的進行。植物對鉛的吸收並不顯著，通常只累積在植物的根部。鉛中毒症狀是便秘、食慾不振、貧血、腹痛、肌肉麻痺與神經方面的症狀，在人體有慢慢累積作用，是一種慢性中毒疾病，然而鉛對兒童中樞神經之發育有影響。

二、重金屬在土壤中的傳輸

(一) 重金屬在土壤中之動態變化

重金屬在土壤中是否容易移動及向下擴散，主要的關鍵在於重金屬是以何種型態存在，一般可以區分為三大類型態：可溶解態、結合態及固定態。可溶解態最容易在土壤中移動及被植物吸收的型態；結合態則是指重金屬在土壤中與有機物結合，伴隨著有機物質而移動，而緩慢釋出的型態；固定態最不容易移動，與其他物質形成沉澱，不容易被植物吸收的型態。

決定重金屬有在土壤中的型態，最主要因子為土壤的酸鹼值與氧化還原電位，且酸鹼值的影響又比氧化還原電位的影響顯著。一般而言，土壤的酸鹼值在 5~7 之間，氧化還原電位介於 400 至 -200 mV。大部分的金屬離子在 pH5 以下、氧化還原電位小於 100 mV 的土壤中溶解度較高。推論在酸性還原狀態的土壤中，金屬離子較容易移動。

不同種類的重金屬與不同性質的土壤之間會產生不同的物理、化學、生物作用，在探討土壤的重金屬污染問題時，最關切的為土壤對重金屬物質的吸附能力，是否容易因淋洗而移動擴散，重金屬型態是否會轉變，以下說明各種不同的作用方式：

1. 交換作用

由於金屬離子的半徑大小與土壤結構組成物質的離子半徑大小相似，而產生取代反應或是交換作用。

2. 吸附作用

泛指土壤表面對金屬離子的固定作用，為影響重金屬在土壤中的行為及生物有效性最重要的作用方式，包含陽離子交換作用(非

特異性吸附)、特異性吸附、有機物結合及共沉澱等作用。一般而言，細質地及高有機物含量之土壤具有較大的吸附力。

3. 溶解作用

重金屬以固體型態之鹽類進入土壤中，其在土壤中具有一定之溶解度，在溶解度以內金屬離子自然會溶解釋出。

4. 沉澱作用

金屬陽離子與土壤中的陰離子作用形成不可溶性之固體沉澱，如此會抑制重金屬在土壤中之移動性及生物吸收有效性。

5. 傳輸作用

植物根部會吸收土壤中的養份元素，若重金屬在土壤中以可溶性的型態存在，則植物在吸收土壤中養份時可能吸收重金屬。植物吸收土壤中養份主要靠質流與擴散作用，此傳輸作用之影響因子包括土壤質地、有機物含量、pH、導電度、擴散係數、降雨量及蒸發量等。

6. 氧化還原反應

金屬離子在土壤中由於土壤環境狀態的改變，金屬離子會有氧化或還原的變化。

7. 轉變作用

物質之物種變化包括無機物之水解或錯合反應，無機物之氧化還原反應，無機物之生物分解反應，有機物之非生物分解反應(水解、光分解、揮發作用)。

(二) 重金屬與土壤結合力之比較

重金屬在土壤中的型態可細分為下列6種不同的型態，其與土壤的結合力不相同，這個性質影響重金屬在土壤中的移動性。

1. 水溶性部分(最弱)：愈容易溶解於環境中，危害性愈大。
2. 可交換性(最弱)：愈容易溶解於環境中，危害性愈大。
3. 有機物錯合性：部分可被微生物分解而溶解於環境中，危害不可忽略。
4. 碳酸鹽鍵結性。
5. 氧化物鍵結性。
6. 結晶構造鍵結性(最強)：難溶解於環境中，幾近無害。

(三) 與重金屬宿命有關之土壤性質

1. pH 值：影響重金屬之溶解度，大部分的金屬離子在 pH5 以下的土壤中，溶解度較高。
2. 有機物含量：主要吸附作用之一，土壤有機物含量越高越容易形成錯合物，對環境危害越少。
3. 黏粒含量：重金屬之吸附位置及轉變之主要部分，土壤黏粒含量越高越容易被吸附固定，對環境危害越少。
4. 質地等級：影響土壤之通氣與排水及重金屬移動、吸附及轉變，砂質地之土壤，通氣與排水越好，重金屬之移動越快。黏質地之土壤，通氣與排水較差，重金屬之移動不易，較不易污染土壤及地下水。
5. 黏土礦物種類：影響重金屬移動及吸附，不同黏土礦物種類有不同之吸附量及吸附位置，因此會影響重金屬之吸附量及未來之宿命。
6. 重金屬之特性與污染衝擊情形：鉛金屬較不易溶解及移動，不易污染農作物及地下水。銅金屬易與土壤中之有機物質形成錯合物，如有機物少則容易溶解及移動於土壤中，所以較易污染農作物及地下水。鎘及鋅金屬則在一般土壤條件下，易溶解及移動於土壤中，較易污染農作物及地下水。

三、重金屬在地下水中之反應機制

重金屬在地下水中會進行各類不同的反應，包括物理、化學及生物等反應，並會影響污染物傳輸速度及反應，這些反應包括：

(一) 吸附反應(遲滯作用)

重金屬會為含水層中之土壤吸附，導致傳輸速度的減慢，這種現象稱為遲滯作用。此外，帶正電的金屬離子因大部分土壤表面是帶負電，因此二者間之吸附力更強。

(二) 化學反應

重金屬在含水層中可能發生的化學反應包括各類水化學的氧化還原反應等。

(三) 生物反應

含水層中有各式各樣的微生物，在適當的條件下，微生物可與重金屬進行代謝反應，包括好氧與厭氧反應。

參考文獻

1. 行政院環境保護署，事業廢棄物行業製程稽查參考手冊——鋼鐵冶鍊業，民國 93 年 12 月。
2. 中國鋼鐵股份有限公司網站資料(網址 <http://www.csc.com.tw/>)。
3. 鋼鐵數位博物館網站資料(網址 <http://museum.csc.com.tw/>)。
4. 經濟部工業局，電弧爐煉鋼業污染防治技術，民國 83 年 6 月。
5. 經濟部工業局，金屬表面處理業土壤及地下水污染預防與整治技術手冊，民國 94 年 12 月。
6. 經濟部工業局，半導體業土壤及地下水污染預防與整治技術手冊，民國 94 年 12 月。
7. 經濟部工業局，印刷電路板業土壤及地下水污染預防與整治技術手冊，民國 94 年 12 月。
8. 經濟部工業局，電弧爐煉鋼還原資源化應用技術手冊，民國 90 年 10 月。

第三章 土壤及地下水污染預防與監測

由於土壤及地下水污染會影響企業的形象與商譽，因此解決此問題的最佳方案即為盡量避免污染土壤與地下水，也就是做好污染預防工作，從源頭上管制污染物使其不進入土壤及地下水。土壤及地下水污染來源包括「氣相」的空氣污染物、「固相」的污染物、及「液相」的污染廢液與廢水，因此做好空氣污染防治、廢水處理、廢棄物貯存與處置工作，並加強廠區工安管理以避免意外事件，加強監測土壤及地下水的品質，切斷污染物進入土壤及地下水的途徑，就有很大的機會達到污染預防的目標。本章將分別就廠內環境管理及污染評估、工廠污染預防措施、土壤及地下水環境品質計畫研擬及土壤及地下水污染緊急應變計畫研擬等4個部分，說明如下。

3.1 廠內環境管理及污染評估

3.1.1 環境管理

工業污染和災害所導致的公害事件，不僅易引發民眾的嫌惡心理因素，圍廠抗爭，亦可能危及勞工健康，進而影響工廠的運作。如工廠經環保機關公告為土壤及地下水污染場址時，對企業經營的影響與衝擊更大，妨礙土地利用，減低銀行融資意願。為謀求事業永續發展，企業宜建置環境管理與查核系統，並納入土壤及地下水污染預防與整治，以長期、持續有系統的監督並考核企業內部環境管理績效。

一、環境風險管理

企業應自行評估工廠運作所可能產生之環境風險，建立環境風險管理機制，企業可參考下列原則評估工廠發生土壤及地下水污染之風險：

(一) 高風險

1. 缺乏有效控制污染物滲漏與洩漏至環境的基礎設施，如：

- (1) 地上儲槽未設置防溢設施、截流溝、緊急應變設備等。
- (2) 未設置收集或防止危害性物質污染地下水體與土壤之設備或措施，如未於油品或化學品可能洩漏地區或逕流水易含有油污之雨、排水系統處，設置陰井或油水分離系統。
- (3) 危害性物質之專門貯存場所未能避風、擋雨、地面堅固及設置二次阻絕設施。

2. 無法預防與偵測污染物滲漏或洩漏至地下環境，如：

- (1) 危害性物質運作時，直接接觸土壤，液態物質未貯存於二次阻絕系統內。
- (2) 未於危害性物質運作或貯存區周圍設置測漏設備或地下水監測井。

(二) 中度風險

1. 在工廠運作管理上，環境風險管理責任不明確，如：

- (1) 防溢設施、截流溝未指派專人負責巡視、檢視及定期保養維修。
- (2) 洩漏物未指定專人負責清理。

2. 管理上，未有效提供最新工業標準與法令規定。

(三) 低風險：不符合良好工業實務(good practice)，但導致環境危害之可能性低。

二、土壤污染風險管理案例介紹^[1]

日商 TDK 公司將工廠土地發生土壤污染風險的評估標準與結果納入公司環境風險管理系統中，該評估標準期能確認出該公司內部土壤污染預防工作的優先順序，以有效地執行環境風險管理的工作。

自 2001 年起，該公司旗下工廠於關廠或遷廠時，進行土壤調查，對於發現污染的工廠，則進行整治，2004 年完成 1 家工廠的整治工作，2005 年則進行 2 家工廠的整治工作，如表 3-1 所示。

表 3-1 TDK 公司 2004 年土壤污染整治情況^[1]

工廠名稱	關廠或遷廠時間	調查項目	調查結果概要	整治方法	整治進度
TDK 由利本庄第二工廠舊址	2004 年 10 月	重金屬	廠內部分土壤鉛超過標準	移除處理被污染土壤	2004 年 10 月完成
市川工廠舊址	2004 年 1 月	重金屬	廠內部分土壤鉛超過標準	移除處理被污染土壤	2005 年開始整治
成田工廠	營運中	重金屬	地下水中硒超過標準	地下水抽出處理(pump and treat)	2005 年 4 月開始整治

3.1.2 污染評估

工廠運作可能造成污染的污染物種類，工廠所處地理位置的水文地質特性及可能的污染傳輸途徑，均是污染評估的重要考量，包括監測井的設計與環境調查評估的程序。

一、污染源

工廠要執行土壤及地下水污染預防工作，首先需由工廠本身之運作特性、潛在污染源及土地使用情形開始瞭解，進一步針對廠內可能具污染潛勢之區域，於平時特別注意並予記錄，以減少可能污染之產生。工廠可能的土壤及地下水污染源，包括：

- (一) 製程反應槽洩漏、管線破裂。
- (二) 地上或地下儲槽洩漏。
- (三) 地下輸油管線破裂。
- (四) 油品與化學品裝卸。
- (五) 廢污水集水池、污水坑與廢水處理場。
- (六) 雨、排水系統。
- (七) 有害事業廢棄物暫存區。
- (八) 有害事業廢棄物非法棄置、掩埋。
- (九) 化糞池。

二、工廠水文地質特性

利用地質鑽探及設井所取得的資訊，可以瞭解及描述工廠水文地質的特性，包括工廠的地質與地層特性，以及定義水文地質特性，如地下水坡降與流向。於進行初步污染評估或調查時，如廠區內未曾進行地質鑽探或設井工作，可參考政府機關調查之區域性水文地質或鑽探資料，如表 3-2 所示，瞭解工廠的水文地質特性。

含水層中砂及黏土的產狀、層面及接觸面的關係是影響污染物傳輸的重要因素，薄層黏土會使地下水水流分離、減緩或改變其方向，進而使污染團向水平及垂直方向延伸。地下水水質因流過污染區域或不同質地的地層有所改變，而未受污染的工廠，可能會因上游工廠的污染源，而污染地下水。污染物的移動與擴散的時間愈長，污染的範圍愈大，污染評估或調查的範圍也變得更大、更複雜、更昂貴。

表 3-2 政府機關水文地質資料內容及來源

項目	資料內容	來源
地質	- 場址所在地地質圖 - 地質狀況描述	- 經濟部中央地質調查所鑽探資料 - 經濟部中央地質調查所網站(區域性地質) - 水利署「水文水資源資料管理供應系統」水資源資料查詢
地表水水文	所屬河川流域、水位、流速、流量	- 台灣河川流域圖 - 水利署「水文水資源資料管理供應系統」水資源資料查詢
地下水水文	- 附近區域水文地質剖面圖 - 地下水流向之季節變化 - 地下水水位面之季節變化 - 地下水流速、導水係數、孔隙率 - 含水層型態、厚度、範圍	水利署「水文水資源資料管理供應系統」水資源資料查詢
地下水使用情形	- 附近民眾使用地下水情形 - 附近其他地下水抽水井汲取狀況	水利署「水文水資源資料管理供應系統」水權資料查詢

土壤鑽孔及監測井設置可取得工廠基本的水文地質資料，設置監測井時可取得土壤柱狀圖及化學分析採樣資料。若欲取得場置性地下水水力坡降及流向之資料，則至少須設置 3 口地下水監測井，其中 1 口監測井須設於地下水之上游，另 2 口設置於地下水之下游。

三、污染物在環境中的傳輸

不同特性的污染物於環境介質中，有不同的傳輸特性，業者進行污染評估時，應先瞭解工廠運作污染物的特性，及其在環境介質中的傳輸特性。茲分別就重金屬與輕質非水溶相液態污染物(light non-aqueous-phase liquid, LNAPL)在環境介質之傳輸特性，說明如下。

(一) 重金屬污染物

重金屬污染物的移動除了受到地下水流速、土壤粒徑、孔隙率等土壤性質之影響外，重金屬是否能被土壤吸附，以及吸附的強度，影響移動速度甚大。通常吸附力愈強，則重金屬愈易留在土壤顆粒上，故移動慢。由於土壤顆粒多數帶負電荷，因此帶正電荷的重金屬離子，如鉛、汞、鎘、鎳、鈷等，易被土壤吸附而不易移動，而逐漸於土壤表面或洩漏處形成累積的狀況。此外，重金屬進入土壤後，會與土壤中的有機物或微生物體形成穩定錯合物，但也可能

被小分子有機物鉗合住而帶著離開土壤。此外，氧化與還原作用會使重金屬溶解度降低或升高，而影響其在土壤中的停留時間，通常重金屬污染物在還原態下移動較快。

(二) 輕質非水溶相液態污染物(LNAPL)

電弧爐煉鋼耗用能源為電及燃料，用電主要以製程為主，主要以重油為主，用於軋鋼製程的加熱爐^[2]，重油屬輕質非水溶相液態污染物(LNAPL)，當其排放或洩漏至環境介質之後，會被土壤吸附或流入通氣帶(未飽和層)中，油品沿著土壤中的孔隙，向下或水平移動而形成污染，一部分的油品，會流經未飽和層而達飽和層(含水層)。油品因其比重小，當達飽和層時，會在飽和層表面處累積，部分則會在毛緣層(capillary fringe)累積，當油品污染物達到飽和層地下水面時，會在該處散佈開，而幾乎不會再往下入滲，因而，油品會在飽和層的上方散佈，以類似「浮油」的型態存在(如圖 3-1)；此外，地下水位因水位的上升與下降，部分浮油會殘留在地下水水位面上下，而形成油漬區(smear zone)(如圖 3-2)。

污染範圍的深度、寬度及空間分布，因污染物洩漏的方式與數量、污染源的型式(地上或地下型)、污染物性質、土壤及地質特性等，產生不同的分布型式。

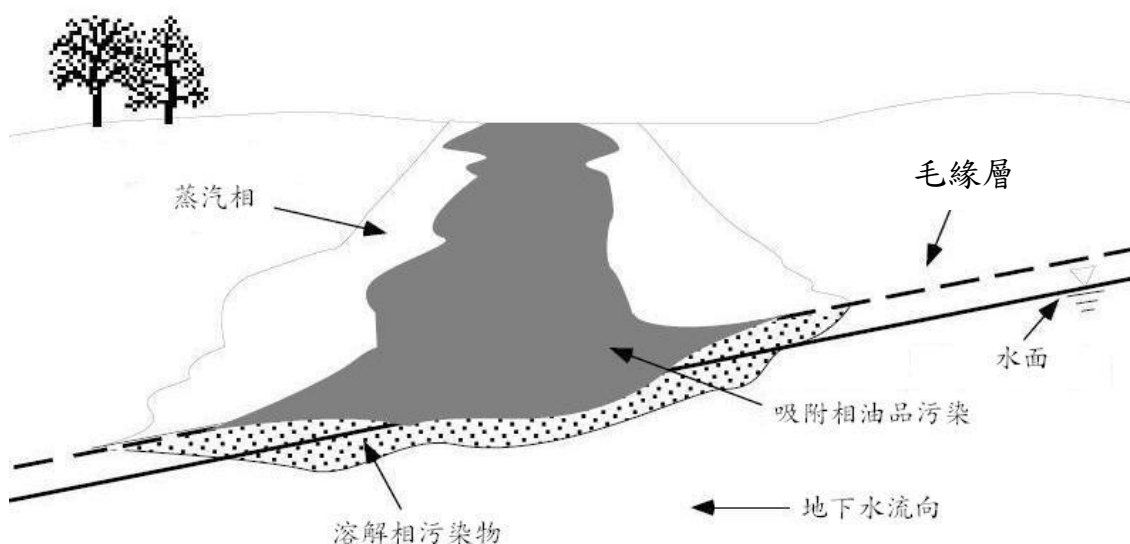


圖 3-1 LNAPL(油品)於地下環境中移動及分布情形^[3]

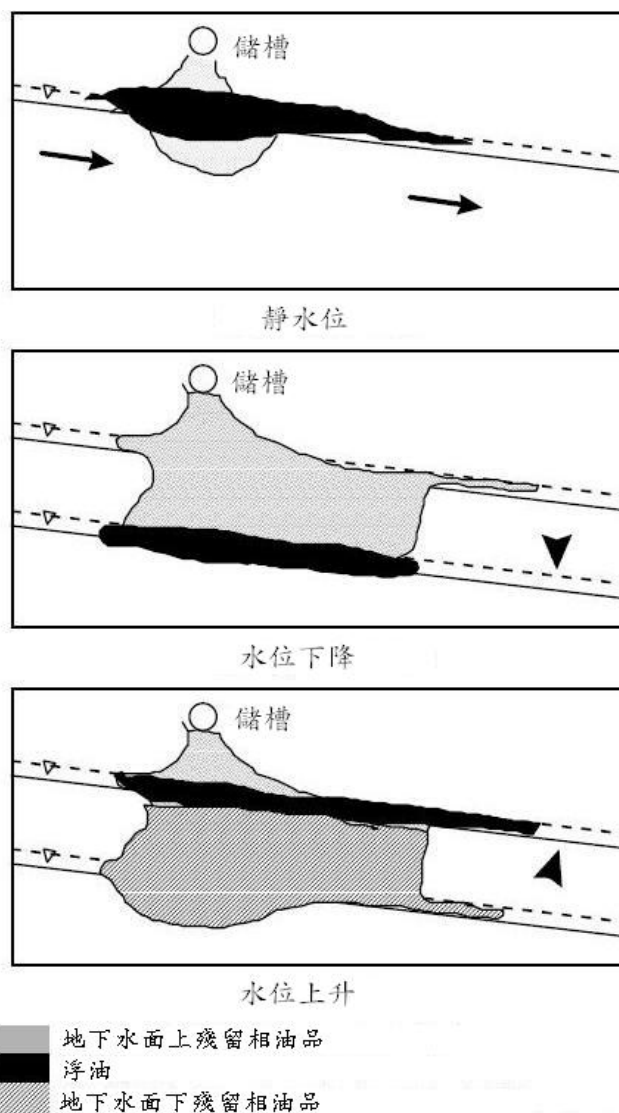


圖 3-2 LNAPL 隨地下水位變動形成油漬區^[4]

四、場址污染評估

企業對瞭解其工廠、作業活動及併購案有關環境議題之興趣日益提高。這些環境議題與相關商業活動結果可藉由使用場址與組織環境評估 (Environmental Assessment of the Site and Organization, EASO)^[5]或環境場址評估 (environmental site assessment, ESA) 之標準方法評估。該等評估可於作業活動中，或於資產併購或撤資 (divestiture) 時進行，並可作為更廣泛商業評估的一部分，以釐清及保護企業本身的權益。近年來，因 RCA 的案例，部分國內金融機構對不動產之抵押貸款有了「污染預防」的考量與要求，以避免抵押之不動產因污染問題而失去抵押之價值^[6]。

(一) 污染評估之目的

執行土壤及地下水污染估與調查之目的，包括：

1. 背景調查。
2. 潛在污染源調查及確認。
3. 污染確認調查。
4. 污染範圍調查。
5. 基本調查。
6. 特殊目的(如環保機關/民意之考量)。
7. 早期預警系統。

(二) 污染評估之方法

初步污染評估旨在確認可能之污染源、污染物種類、傳輸途徑及潛在受體，以作為工廠後續污染預防措施、污染調查或早期預警或監測系統規劃之用。

參考美國材料及試驗協會(American Society for Testing and Materials，以下簡稱 ASTM)第一階段場址評估(ASTM E1527)^[7]，初步污染評估之調查，至少須包括下列工作：

1. 工廠之土地使用歷史及目前使用狀況。
2. 污染物移動路徑評估。
3. 場址所有人及員工訪談。
4. 區域地質及水文地質調查。
5. 敏感受體調查。
6. 工廠及其周圍土地使用狀況勘察。
7. 相關環境報告之審閱。
8. 場址相關紀錄之審閱。

執行工廠初步污染調查工作之人員需有豐富的土壤及地下水相關知識及實務經驗，否則調查結果可能無法明確評估工廠本身及附近地區之潛在污染源，進而誤導後續工作的規劃，或誤判場址的污染狀況，進而造成企業本身的損失。

3.2 工廠污染預防措施

由於國內各項環保法規已趨完整，環保觀念亦趨於成熟，再加上民眾環保意識高漲，近年來除了少數不肖業者故意棄置或排放污染物，絕大部分的土壤及地下水污染事件均為在業者不知情的狀況下，或因工廠發生意外事件所發生，其中又以地下儲槽或管線洩漏最常發生。

一般而言，工廠要執行土壤及地下水污染預防工作，首先需由工廠本身之運作特性、潛在污染源及土地使用情形開始瞭解。本節將分別就污染預防管理原則與污染預防措施等 2 個部分，說明如下。

3.2.1 污染預防管理原則

鋼鐵冶煉業所產生的污染物，如未妥善處理，容易造成環境污染。業者宜依工廠的運作特性，將土壤及地下水污染預防納入工廠之環境管理系統中。

一、污染預防基本原則

土壤及地下水污染預防管理之基本原則如下：

- (一) 承諾採購(affirmative procurement)：使用替代品、安全與可回收之原物料。
- (二) 減少水的使用，或使用乾式製程。
- (三) 減少或避免雨、排水系統流過廠區、貯存區或高污染潛勢區。
- (四) 廢棄物回收、利用。
- (五) 隔離潛在污染源傳輸至土壤、地下水之途徑。
- (六) 污染預防與緊急應變之職工訓練。

二、污染預防自我體檢

土壤及地下水污染預防應先經過妥善的規劃，以便認識問題的本質，研擬對應的對策和方案，工廠可依下列程序自我體檢，並研擬對策與方案：

- (一) 瞭解有關污染防治之環保法令與相關規定。
- (二) 自評：工廠要執行土壤及地下水污染預防工作，首先需由工廠本身之運作特性、潛在污染源及土地使用情形開始瞭解，進一步針對廠內可能具污染潛勢之區域，於平時特別注意並予記錄。
- (三) 納入工廠環境管理系統。
- (四) 研判污染問題的防治方案。
- (五) 防治方案評估與衡量成本效益。

三、洩漏預防與管制計畫

工廠自行評估廠內運作有污染洩漏之虞時，宜針對廠內潛在污染源制定洩漏預防與管制計畫，計畫內容包括：

- (一) 設備設計：如儲槽及管線材質規格，鋪設 Epoxy 防漏。
- (二) 操作程序：如化學品置放、貯存及運作作業管制。
- (三) 預防保養技術。
- (四) 建造技術：明管、防震設計。
- (五) 職工訓練。
- (六) 洩漏應變能力。
- (七) 替代品與替代製程。
- (八) 新技術的應用。
- (九) 調整廠區或設備配置。
- (十) 洩漏預防管制措施與計畫。
- (十一) 有害事業廢棄物清理應變計畫。
- (十二) 地面逕流與入滲管制系統。
- (十三) 工廠地理位置與使用分區。

3.2.2 污染預防措施

廠內建立明確的污染預防措施，是達成土壤及地下水污染預防目標最簡單且最有效的作法，業者可朝物料管理、有害事業廢棄物貯存、儲槽管線定期維護與檢測、預防儲槽與管線洩漏管理措施與預防水質污染擴散等方向著手，分述如下：

一、物料管理

鋼鐵冶煉業工廠本身所使用的原物料種類多，所以有效管理化學品原物料，是降低環境污染的關鍵。針對廠區內的原物料管理上，提供下列管理要點以供參考：

- (一) 廠區內化學品的存放，應有特定的場所或貯放方式，室外避免放置化學原料、廢棄物、空桶及閒置設備。
- (二) 化學品包裝應完整，且應有適當的標示(品名、保管人、危害性等)，並備妥相關之物質安全資料表(MSDS)資料文件。
- (三) 人行通路不得置放化學物質，尤其具危害性化學物質、危害性氣體及易燃易爆物質等。
- (四) 氣體鋼瓶應予固定放置，尤其是危害性氣體鋼瓶或高壓性氣體鋼

瓶，宜加強管理。

- (五) 開封過的原料應加蓋或袋口捆束，防止粉塵、原料逸散或揮發等。
- (六) 化學品貯存應注意相容性問題，不相容物質不可放在一起，以避免發生爆炸、火災等意外事故；易燃物質應遠離火源。
- (七) 除正常情況外，應考慮在異常狀況發生時，原物料有傾倒、破裂、撞擊、震動等之可能性，以及發生該等情事時對環境可能的影響。

在工廠作業面的管理上，提供參考如下：

- (一) 工作場所應力求整潔，地面上不可有散落的原物料、油污及廢棄物。
- (二) 工作場所內，原物料、廢棄物及中間產品應區隔放置，並進行妥善標示。
- (三) 工作場所內各類設備或裝置應能適當的維護，以防止異常操作，並避免不正常的廢氣、廢機油或其他污染情事發生。

二、有害集塵灰貯存

在有害集塵灰貯存方面，有害集塵灰與一般事業廢棄物必須分開貯存，且所有的貯存設備都要有明顯的中文標示，並防發生太空包破裂或有害集塵灰溢出的情形。貯存設施應符合「事業廢棄物貯存清除處理方法及設施標準」，須考慮如何防止地表水的入滲，如貯存設施不可避免會有廢水、廢氣、惡臭等污染的產生，必須妥善的收集並處理以防止對於環境的污染發生。且有害集塵灰應注意該廢棄物貯存期限以 2 年為限，如果貯存時間會超過時限必須取得地方主管機關同意。

三、儲槽管線定期維護與檢測

工廠應訂定管理規則、規定及要點，由現場單位執行定期維護與檢測廠內所有儲槽管線。

(一) 儲槽

- 1. 定期檢查槽體是否有洩、滲漏之情形；發現洩漏、腐蝕或功能降低時，應考量修護，必要時更換儲槽。
- 2. 檢查槽體基座、連接處、被覆或塗層、防溢堤壁體與管線系統定期維護相關零件、閥門與設備，避免失去功能。
- 3. 暴雨、地震或大量洩漏時(後)，檢查露天儲槽擋油堤或防溢堤沖刷與溢流的情形。
- 4. 監測：定期巡查、自動檢查、監測系統，如漏油偵測器、閉路電視監視系統(CCTV)...等。
- 5. 定期進行非破壞檢測如陰極防蝕接點檢查、試壓等。

(二) 管線

1. 地面管線

- (1) 避免機械性損壞，地面管線應有適當的支撐與標示。
- (2) 為降低破裂所造成洩漏之影響，可裝置低壓偵測器(low-pressure sensor)與安全停機閥門(safety shut-down valve)。

2. 地下管線

- (1) 任一段管線可目視時，應檢視其外觀是否有損壞之情形，如有鏽蝕時，應進行檢測或進行矯正。
- (2) 管線新建、修改、重遷或更換時，應進行檢查、測漏與試壓。

3. 腐蝕預防(含內部及外部)

陰極防蝕電位量測、緊密電位檢測、智慧型 PIG 檢測、管線更新與記錄保存。

4. 巡查

- (1) 注意管線週邊地形、地物之變化。
- (2) 廠內施工時，應確認管線位置是否在施工範圍內並告知施工單位。

(三) 研訂測漏計畫

工廠應針對廠區儲槽與管線配置情形擬訂測漏計畫，包括定期檢查及重點監測，藉由例行定期檢查及早查覺儲槽系統是否發生變形、腐蝕等問題，並以重點監測，期能於洩漏初期即能迅速得到洩漏訊息，以有效掌握阻止污染擴大及處理之契機。有關工廠測漏計畫之範例如圖 3-3 所示。

四、預防儲槽與管線洩漏之管理措施^[8]

(一) 建立管線管理資訊系統

1. 建立管線空間座標圖資及一般屬性資料，讓工廠管理者利用個人電腦即可即時查取管線相關資料。
2. 經由儲槽與管線屬性資料可查詢有關儲槽與地下管線之名稱、長度、口徑、完工年度、輸送物質種類、檢測報告、陰極防蝕電位、巡檢管理、異常應變、維修保養、管線故障排除等管線資料，協助工廠管理者隨時掌握相關資訊。

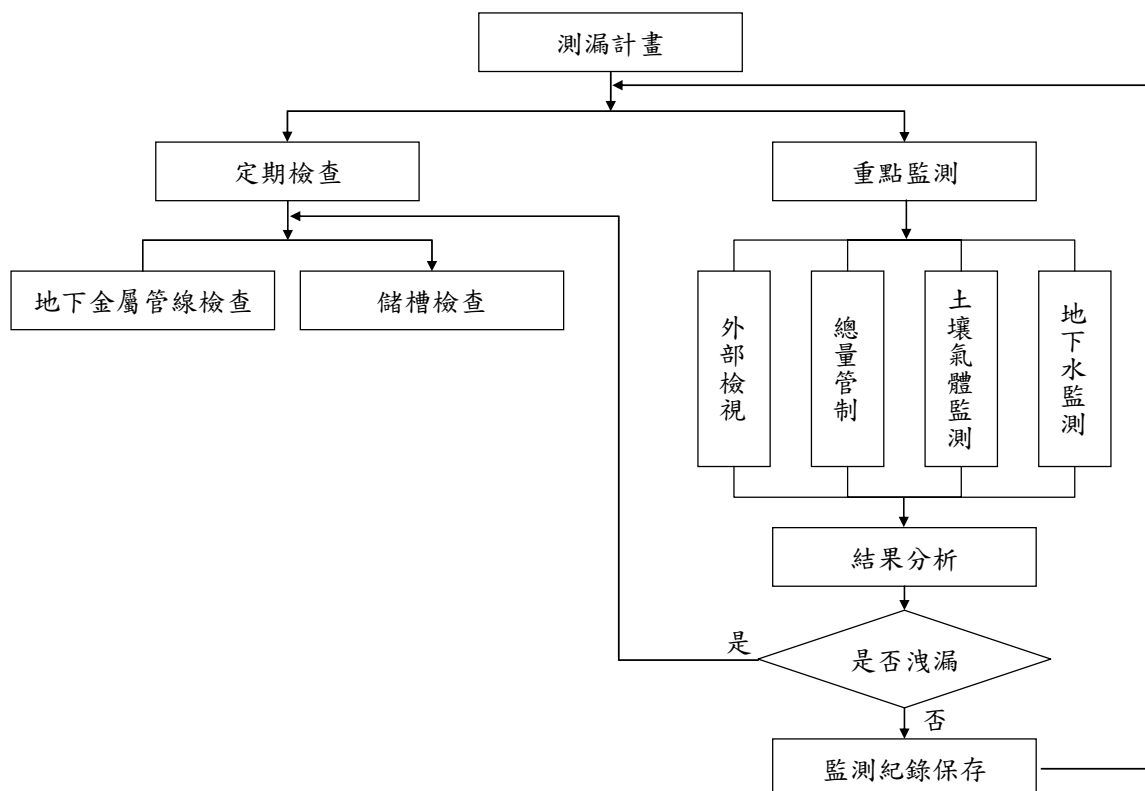


圖 3-3 工廠儲槽管線測漏計畫範例

(二) 實施管線風險管理

各工廠無論是管理單位或操作維護單位，甚至工安環保單位均應了解管線之風險，並依風險高低，實施各種保護、防範、改善措施，進而降低管線風險，維持管線輸送暢通、保障工廠自身的安全、減少對工廠鄰近居民的潛在危害，間接降低工廠本身的營運成本。

(三) 落實儲槽、管線洩漏之防範管理

各工廠營運單位應做好儲槽與管線之維護與監測工作，期能有效防範儲槽與管線洩漏所造成之環境污染以及原物料的損失，避免工廠之財物損失、與環境污染與健康危害賠償問題。

五、戴奧辛排放問題

人類受到於戴奧辛危害的主要途徑為(1)吸入受污染的氣體及微粒、(2)皮膚直接接觸及吸收、及(3)攝食受污染的食物或飲水。其中，食物攝食是最主要來源，經食物攝取的戴奧辛佔有 90%以上，並逐漸累積在體內，進而產生慢性毒害；不過，大多數人體內都含有或多或少的戴奧辛，只要攝入量不高，對健康不至於有太大影響。

在環境中戴奧辛的主要傳輸途徑，是大氣環境中的戴奧辛經沉降機制附著於農產品或水體，再經由食物鏈進入人體。彰化縣線西鄉及伸港鄉鴨蛋戴奧辛事件，使得戴奧辛管制及排放問題，成為近年來政治與媒體所關心的重大議題及環保機關管制的重點。業者如位處戴奧辛污染區域內，如無其他明確污染來源的情形下，容易成為誤會事件的關注對象。因此，對於鋼鐵業集塵灰的貯存、清理及廢氣的排放，除應確實遵循法規的規定妥善處理外，並應平時與居民加強溝通，以消弭附近居民及環保單位對戴奧辛的疑慮。

3.3 土壤及地下水品質監測計畫研擬

當洩漏情形發生於地下環境時，初期不易察覺污染，俟發現時，通常污染情形已達相當嚴重程度。因此，工廠為確切瞭解及掌握廠內地下環境品質，及做好土壤及地下水污染防治工作，可委託專業顧問或檢測機構辦理土壤及地下水品質監測計畫。

一、計畫目標

工廠為執行土壤及地下水品質監測計畫之目標如下：

- (一) 藉由監測結果，及早瞭解廠區水文地質特性、土壤及地下水可能污染現象。
- (二) 釐清及界定工廠與周圍工廠間之土壤及地下水污染權責。
- (三) 建立長期監測調查系統，作為預警與查核之依據。

二、工作內容

工廠土壤及地下水品質監測計畫之主要工作內容如下：

- (一) 基本資料之蒐集與研判。
- (二) 地質調查與建立水文地質概念模式。
- (三) 土壤可能污染源調查分析。
- (四) 水質監測井之規劃與設置。
- (五) 地下水水質定期採樣與分析，如於每年豐、枯水期各 1 次。
- (六) 土壤及地下水環境品質狀況綜合研判分析。
- (七) 後續工作規劃與建議。

工作計畫執行一般分為二階段，第一階段為瞭解地下水位狀況及土壤污染潛勢之普查，第二階段則依第一階段現場調查結果進行詳細調查，並進行土壤及地下水環境品質狀況綜合研判分析，最後提出後續工作規劃與建議。土壤及地下水品質監測計畫工作流程之範例，如圖 3-4

所示。

有關土壤採樣點及地下水監測井的配置、深度與頻率之規劃、採樣工具選擇、分析方法、快速篩試工具的應用與專業機構的聘請等，請參考本手冊第四章之說明。



圖 3-4 工廠土壤及地下水品質監測計畫工作流程範例

三、監測結果處理與分析

工廠土壤及地下水品質監測結果會與環保署於 90 年 11 月 21 日發布之「土壤污染監測基準」、「地下水污染監測基準」、「土壤污染管制標準」與「地下水污染管制標準」之相關項目之基準值或標準值進行比較分析，相關法規可於環保署環保法規網站(網址：<http://w3.epa.gov.tw/epalaw/index.aspx>)下載。

四、案例介紹^[9]

國內某大型鋼鐵公司為了解其廠區製程特性與污染潛勢，規劃於廠區土壤及地下水污染調查前，先將所有製程列出，依其污染特性與潛勢做比較，依法規規定採樣數、位置等原則，考量經費、人力及時間等，規劃廠內土壤品質調查計畫。

(一) 第一次廠區土壤品質調查

於民國 84~85 年間進行首次全廠區土壤品質調查，以網格法，將全廠區均分為 24 區塊，就其中位於高污染潛勢生產製程區之 11 區塊進行採樣分析，共採集約 200 個表土及裡土樣品，以王水酸溶法(廢棄物分析方法)分析 8 種重金屬含量，並與「台灣地區土壤重金屬含量標準之等級區分表」進行比較及分析，分析結果做為規劃及管理土壤污染防治工作之主要參考依據。

(二) 第二次廠區土壤及地下水品質調查

民國 89 年土污法公布生效，該公司於民國 89 年至 91 年間，進行第二次全廠區土壤及地下水污染調查。委由學者、工程顧問公司與檢驗機構所組成的專業調查團隊，就廠區進行全面性的土壤及地下水污染調查及污染潛勢評估工作。主要工作包括：

1. 調查土壤地質與地下水層的結構與水文。
2. 進行全區域之大範圍採樣，以及特定區域之細部採樣，分析土污法污染管制項目。
3. 對於污染潛勢較高的製程進行環境稽核。
4. 評估整體污染潛勢，提出結論及建議。

調查工作展開前，由該公司環保單位向全廠主管說明計畫內容，並由工作團隊至各製程現場勘察製程設備及相關之儲槽、地下管線、廢棄物堆置區及原料堆置區等，依經驗初判各區之污染潛

勢，並參考該公司製程資料及第一次調查結果等，確認採樣點位置及數量。總體土壤及地下水品質調查之執行成果如下：

1. 完成土壤污染調查：土壤重金屬、有機物及土壤氣體調查。
2. 分析土壤污染潛勢：土壤基本特性分析與評估污染擴散潛勢。
3. 地下水污染調查：設置地下水監測井、取樣分析與試驗。
4. 地下水污染潛勢評估：利用電腦模式模擬評估地下水污染情形。
5. 建立土壤及地下水品質電腦資料庫。
6. 完成環境品質狀況稽核報告。

第二次調查提供全廠區土壤及地下水環境之背景資料並建立完整之廠區監測網，對廠方長期掌握廠區土壤及地下水質情形與潛勢，規劃、執行土壤及地下水環境之污染預防、緊急應變以及環境管理等工作，均有實質助益。

調查過程中發現部分區域土壤中，部分污染物濃度輕微超過標準的區域，即行細部調查或直接進行污染清理，於調查計畫完成前確認整治完成。第二次調查扮演廠區土壤及地下水污染稽查及矯正的角色，對公司整體環境管理具正面意義。

3.4 緊急應變計畫

3.4.1 因應緊急事件之準備

一、成立應變工作小組

視工廠規模大小成立適當規模應變工作小組，並指定專人負責，以處理意外污染事件及污染預防等相關事宜。

二、通報體系

意外污染事件之通報應納入工廠工安、環保通報系統中，於緊急事件發生時，現場員工應快速通報。同時，平時應建立與環保工安與警政單位聯繫之管道。

三、應變或搶救器材及設備

(一) 工廠應自行檢視其作業特性與需要配置土壤及地下水污染應變或搶救器材及設備。

(二) 工廠應設置應變或搶救器材及設備之種類與數量清單，並辦理定期

檢查及保養維護。

四、訓練及演習

- (一) 工廠應將污染物洩(滲)漏污染事件列入年度應變演習計畫，且每年應至少辦理應變演習及教育訓練 1 次。
- (二) 工廠應參考歷次污染物洩(滲)漏污染事件與應變演習情形檢討缺失，並作有效的矯正及預防措施。

3.4.2 緊急應變

土壤及地下水意外污染緊急事件發生時，第一步驟應儘速掌握狀況，包括外洩量或滲漏量、滲漏物質與特性調查、污染源水文地質特性、地理及地形特徵等。此外，評估洩漏與滲漏物質的可能傳輸途徑，迅速找出發生洩漏或滲漏之儲槽、管線或機具設備等，並停止其運作，以有效抑制洩(滲)漏源之持續外洩。同時，於污染擴散與傳輸途徑儘速設置攔截與回收設備，避免污染擴散至廠區外，造成環境公害事件。於土壤或地下水檢測結果發現有超過管制標準值時，應評估是否須進一步進行整治。在現況的掌握上可參考本手冊第 3.3 節「土壤及地下水品質監測計畫研擬」的執行及預警監測結果，瞭解廠區水文地質特性與地下水流向。

緊急應變流程如圖 3-5 所示，工作內容如下：

一、現場勘查及初步調查

意外污染事件發生後，應儘速成立應變工作小組並完成現場勘查及初步調查，必要時可聘請專業顧問或顧問機構協助進行，工作的重點包括：

- (一) 取得污染區域之廠區配置圖及工廠鄰近場址之地圖，必要時於現場繪製。
- (二) 審視工廠運作紀錄，包括固定污染源監測紀錄、廢水處理設施監測及運作紀錄、廢棄物清理計畫書及毒性化學物質運作等相關資料，以及土壤及地下水品質監測紀錄。
- (三) 檢視環境管理計畫評估之高污染潛勢區名單，藉由人員現場勘查、或適當儀器之檢測予以確認。除非有明顯證據確認出污染源，後續調查工作不應中斷。另外，洩漏或滲漏可能係 1 個以上污染源所造成。

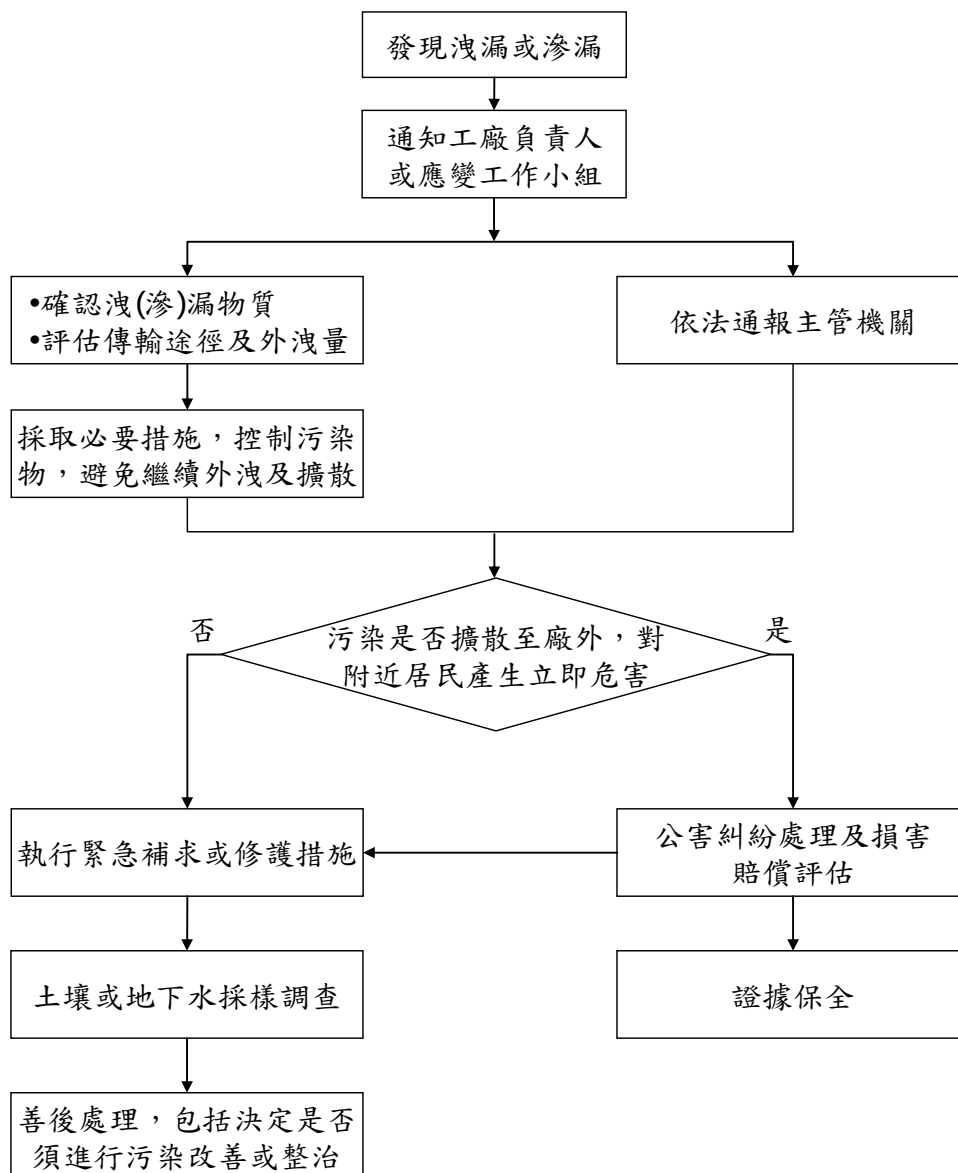


圖 3-5 工廠緊急應變處理流程

(四) 初步調查結果、現場測定儀器或樣品檢驗結果研判污染情形，如需進一步執行污染調查，應訂定調查計畫或採樣計畫書並進行採樣分析。

(五) 當污染屬實，如有立即危害人體健康及破壞生態環境之虞時，應及早採取緊急應變必要措施。

二、採取緊急應變措施之時機^[10]

土壤及地下水意外污染事件發生時，應變工作小組應先判定污染情形是否會威脅到人體健康或生態環境，並採取適當緊急必要措施，以降低、減小、安定、緩和或排除污染物之排放、洩漏或滲漏，或潛在污染

物排放、洩漏或滲漏之威脅，或來自兩者之危害結果。採取緊急處理必要措施之時機，包括：

- (一) 污染擴散至廠區外，飲用水供應系統(如污染場址附近居民使用地下水做為飲用水來源)已遭受污染或有污染之虞時。
- (二) 鐵桶、儲槽或容器中之毒性化學物質、有害廢棄物、油品或污染物，有持續洩漏或滲漏之虞時。
- (三) 地面上有高濃度之毒性化學物質、有害廢棄物、油品或污染物，且有移動、影響作業人員健康之虞時。
- (四) 遇到會導致毒性化學物質、有害事業廢棄物、油品或污染物移動或排放之氣候條件時(如颱風、豪雨、洪水等)。
- (五) 經由測爆器檢測疑似污染源附近之地下公共管線系統，測爆值(explosive level)超過 25%，有造成火災或爆炸之威脅時。
- (六) 中央或地方環保機關政策性決定應採取緊急應變之其他可能的污染物排放時。
- (七) 其他可能危害人體健康或破壞生態環境之情況或因素發生時。

三、緊急應變措施

在發現洩漏、滲漏或監測結果發現超過污染監測基準後即刻展開緊急應變，主要為收集洩(滲)漏物質、控制污染源、防止繼續擴散的發生，以減輕污染對人體健康與環境的影響。

(一) 污染減輕措施

- 1. 控制洩漏污染源，如停止疑似洩(滲)漏油槽或管線之使用，或抽除化學品或油品。
- 2. 設置障礙物(如攔油索、土堤)或土壤表面設置覆蓋物以阻絕污染物擴散及保護環境敏感點。
- 3. 停止抽用地下水。

(二) 污染物移除作業：移除廠區內高污染土壤，以減少該地區的污染擴散。

(三) 如地下水污染擴散至廠區外有影響飲用水水質之虞時，應提供居民替代飲用水。

(四) 其他相關措施，包括：

1. 污染區以警示帶隔離。
2. 使用吸油棉、吸油索(如圖 3-6)，吸附化學品或油品。
3. 築堤防護。
4. 設置截水溝或攔污索。
5. 管制截排水、污水、廢水系統。
6. 儲槽或管線密閉測試。
7. 覆蓋或遮蓋污染物。

工廠緊急應變所採取的緊急必要措施應講求時效性及機動性，現場工作人員或應變工作小組日常即應加以演練、檢查及熟悉計畫內容，以加強對緊急狀況之應變能力及正確的處理程序，並熟練安全防護器材的使用。

四、善後處理

- (一) 儘速檢討發生污染的原因與研討矯正預防之改善對策，包括如進一步調查證實土壤及地下水檢測結果超過管制標準值時，應考量選定後續污染改善與整治方案，以避免殘留污染物的擴散。
- (二) 追蹤管制矯正預防之改善對策辦理情形，防範類似污染事件再度發生。



圖 3-6 吸油棉與吸油索及於污染場址使用狀況

(三) 污染事件經妥善應變處理後，應即行恢復工廠運作之相關行政程序。

(四) 應變處理所衍生的廢水、油污、廢棄物或受污染土壤應妥善處理。

五、公害糾紛處理及損害賠償評估

(一) 依環保署「公害糾紛處理法」(91.06.26)之規定辦理。

(二) 污染事件發生時，應立即拍照蒐證並確實掌握污染現況及實際損害狀況。

(三) 必要時委託國內學術研究機構進行污染現況調查及損害賠償評估。

參考文獻

1. TDK, TDK Sustainability Report 2005, 2005.
2. 環保署，行業別污染排放清潔指標及規範建立計畫，民國 89 年 11 月。
3. USEPA, Ground Water Issue—Light Nonaqueous Phase Liquids, July 1995.
4. Ministry for the Environment New Zealand, Guidelines for Assessing and Managing Petroleum Hydrocarbon Contaminated Sites in New Zealand, October 1999.
5. USEPA, Estimating Potential for Occurrence of DNAPL at Superfund Sites, January 1992.
6. 中國國家標準，環境管理—場址與組織之環境評估，CNS 14015，民國 92 年 11 月。
7. 環保署，環境場址評估作業行政指引建制計畫，民國 92 年 4 月。
8. ASTM, Standard Practice for Environmental Site Assessments：Phase I Environmental Site Assessment Process, E 1527-05 2005.
9. 鄧兆章，儲槽管線維護與監測實務，經濟部工業局環保技術輔導計畫「土壤及地下水應用技術講習會講義」，民國 93 年 5 月 26 日。
10. 張西龍、吳一民，土壤及地下水污染調查原則與實務介紹，台灣土壤及地下水環境保護協會簡訊，第 18 期，民國 95 年 1 月 10 日。
11. 環保署，土壤及地下水污染整治工作之規劃及技術支援計畫—第三冊 土壤及地下水污染事件應變處理參考手冊，民國 93 年 4 月。

第四章 工廠土壤及地下水污染調查

工廠因土壤及地下水環境品質或污染之不同調查需求，及污染發生的原因與工廠運作現況之不同，其調查策略與採樣方法亦有所不同。本章介紹如何進行污染調查規劃之步驟與內容，包括場址概念模式之建立，說明採樣器具與快速篩試之選用原則及注意事項。當調查工作複雜時，則可考慮聘請在此領域具有專長及經驗之專業機構，本章亦將提供專業機構聘請之原則。此外，並以國內外執行的案例加以介紹說明。

4.1 污染調查應考慮事項

工廠面對土壤及地下水污染調查時，有許多必須考慮的因素，如採樣的目的、樣品的代表性、採樣的限制等。

4.1.1 採樣目的

一、一般採樣目的^[1]

理想的採樣設計務必於採樣之前已建立某些目的與假設，或建立場址概念模式。一般採樣目的可歸納為：

- (一) 追查某一污染源的污染特徵。
- (二) 瞭解某一污染場址之污染特性及其污染範圍。
- (三) 判斷某一污染事件其污染層面是否已超過環境涵容能力之閾值(threshold value)。
- (四) 確認高污染區域(hot spot)之位置或污染團之記敘。
- (五) 估算採樣母體的平均污染特性或具有某些污染特性的比例多寡。
- (六) 監測環境污染狀況改變之趨勢。

二、符合法規規定

依土污法相關規定，與工廠有關之土壤及地下水污染採樣與調查工作大致可分為場址背景調查及污染範圍調查 2 種，茲說明如下：

(一) 場址背景調查

土污法第 8 條第 1 項規定：「中央主管機關指定公告之事業所使用之土地移轉時，讓與人應提供土壤污染檢測資料。」，土污法第 9 條規定：「中央主管機關指定公告之事業於設立、停業或歇業前，應檢具用地之土壤污染檢測資料，報請所在地主管機關備查

後，始得向目的事業主管機關申辦有關事宜。」因此，中央主管機關指定公告之事業所使用之土地移轉時，或事業於設立、停業或歇業前，應進行場址土壤污染調查工作，以及早發現工廠內可能之污染來源及污染狀況。此外，產業為避免不慎購入污染土地，或於租用受污染土地後捲入污染糾紛，或出售土地後發生污染責任問題，於租賃、買賣土地前宜進行土壤污染調查，以釐清污染責任^[2]。

(二) 污染範圍調查

土污法第 11 條規定：「...控制場址未經公告為整治場址者，所在地主管機關得依實際需要，命污染行為人提出污染控制計畫。」，同法第 12 條規定：「整治場址之污染行為人或污染土地關係人，得於各級主管機關進行調查評估前，提出土壤、地下水調查及評估計畫，...」，及第 16 條規定：「整治場址之污染行為人應依第十二條之調查評估結果，訂定土壤、地下水污染整治計畫...」，因此，於環保機關完成查證及公告場址為控制、整治場址後，污染行為人均需進行場址土壤及地下水污染調查工作，以研判污染來源及調查評估污染範圍。

4.1.2 採樣的代表性^[1]

所採集到的樣品應具有實質上的證據，以及採樣過程之週全性。包括：

- 一、何處採(where to take samples)：採樣位置的經緯度。
- 二、何時採(when to take samples)：採樣的起始時間和終止時間，以及採樣時間的時段間隔。
- 三、採多少樣品(how many samples to take)：需採多少個樣品及多重的樣品。

4.1.3 採樣的限制^[1]

選擇採樣設計可能的限制有 4 種：

- 一、採樣/分析的限制：包括量測儀器於現場或實驗室技術的靈敏度及選擇性的要求，以及現場技術執行於低溫、高濕度，或於某個季節或天氣型態的樣品採集能力。
- 二、時間/進度的限制：包括季節性的限制，如暴露與季節的關係。
- 三、地理的限制：包括如可能無法採樣，及任何可能妨礙準確識別採樣位置的地理障礙(如河川、圍籬等)。
- 四、經費的限制：需考量整體資料收集程序如從野外樣品採集、運送、保存，

到分析樣品、資料輸入及確認等整體成本之支出。

4.2 擬定土壤及地下水污染調查計畫

擬定初步土壤及地下水污染調查計畫時，必須建立場址概念模式(site conceptual model, SCM)，作為擬定土壤及地下水污染調查計畫之依據。

4.2.1 場址概念模式之建立

業者進行工廠地下環境調查前，可先建立場址概念模式，瞭解工廠內之潛在污染物、傳輸途徑與受體間之關係，做為後續地下環境調查與採樣佈點之依據，並以最具成本效益之採樣分析方式，確認污染物之存在。

一、場址概念模式內容與應掌握重點

(一) 場址概念模式之內容

場址概念模式之內容包括場址之地質、地下水流場、污染源、傳輸途徑與受體之圖解與說明等，並含定性與定量的資訊，以作為測試模式與假設的正確性。場址概念模式不斷地透過建立、測試及依調查資料更新與對場址進一步瞭解，所構成的互動過程，並隨著污染場址概念模式的成熟，可增進人們對場址概念模式的信心。

(二) 建立場址概念模式應注意事項^[3]

1. 避免過於複雜。
2. 基於測試及調查資料的更新，可能發現所採用的假設是錯誤的。
3. 假設與不確定性應被清楚的描述與界定。
4. 由於可取得的資料有限，污染場址概念模式不可能完整地描述場址的實際情形，僅為摘要、概念式地描述場址的情形。
5. 部分資訊可能會產生相互衝突的情形，需進一步蒐集資料或進行檢測，予以驗證。

二、場址概念模式之類型

場址概念模式之類型，依所彙整資料之情形可分為敘述、圖示與關聯圖等 3 種方式^[4]，來展現個別污染場址概念模式。摘要說明各類型場址概念模式如下：

(一) 敘述(narrative description)

依資料彙整與研析之結果，以文字敘述的方式，說明場址的污

染狀況，內容因資料彙整程度之不同，詳細程度亦有所不同，敘述內容將摘要說明污染源與受體間相互關係與可能產生的影響。對於污染狀況非常單純的場址，以敘述方式即可說明場址污染物傳輸之概念。

(二) 圖示(pictorial presentation)

以圖示方式展示污染場址概念模式，應包括污染場址概念模式主要的構成要素：污染源、受體、污染源與受體間之相關性(如污染傳輸途徑與機制)。污染場址概念模式以圖示方法展示，容易讓人們瞭解場址污染物傳輸的概念，有關油品污染場址概念模式圖示之範例，如圖 4-1 所示。此外，亦有以污染場址水文地質剖面圖，展現土壤、地下水污染與水文地質關係之水文地質概念模式，如圖 4-2 所示。

(三) 關聯圖(graphical presentation)

關聯圖可以簡要地呈現出完整與不完整的污染暴露途徑，圖 4-3 為單一土壤污染源、污染暴露途徑(人類為受體)之場址概念模式。調查過程中可能會確認出間接污染源(secondary source)或間接污染途徑(secondary pathway)，可依實際資料蒐集與彙整情形，該等污染源與污染途徑加入關聯圖中。此類型污染場址概念模式常用於人體健康風險評估作業。

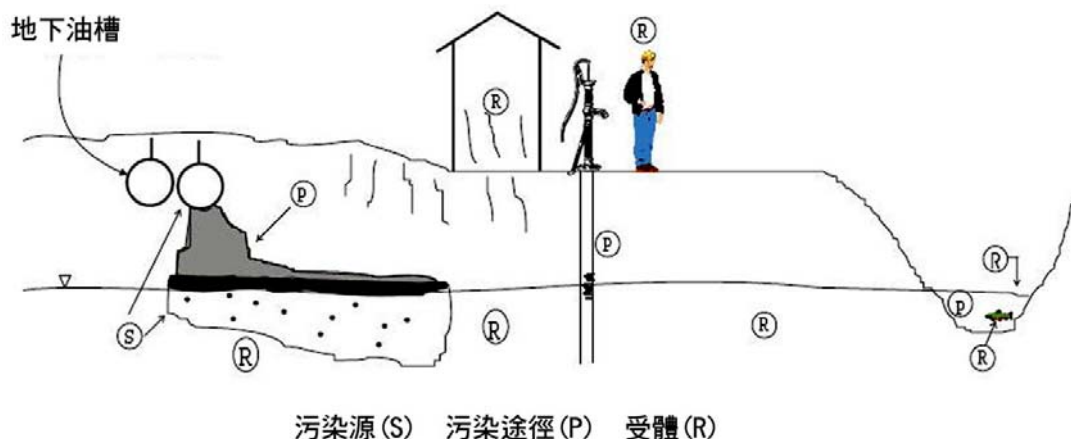


圖 4-1 以圖示方法展示油品污染場址概念模式

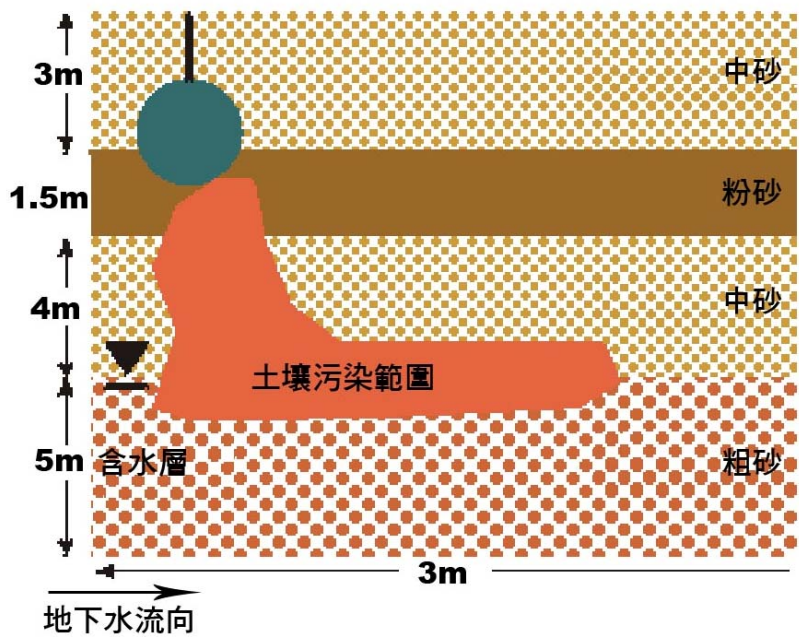


圖 4-2 以水文地質剖面圖展示油品污染場址概念模式(水文地質概念模式)

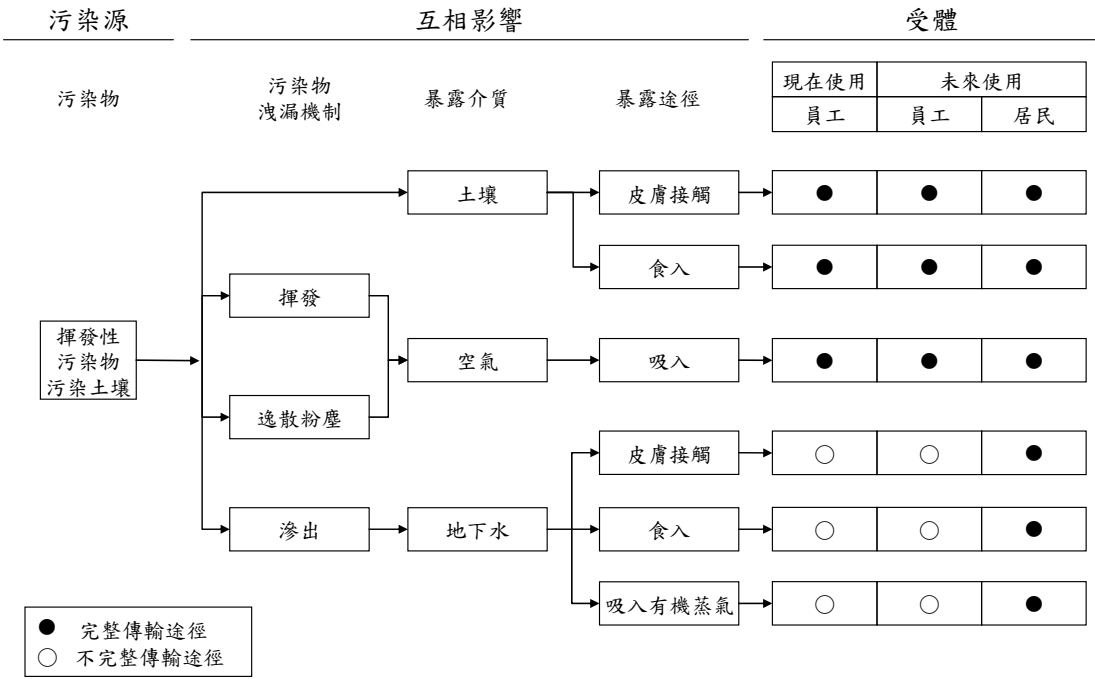


圖 4-3 污染暴露途徑(人類為受體)之場址概念模式

三、場址概念模式之效益

(一) 確認資料缺口，做為後續調查工作方向

由於調查初期取得的資料有限，在初步場址概念模式建立後，尚有許多資料須進一步蒐集與釐清，須透過進一步的文獻資料蒐集，及(或)擬定土壤及地下水採樣分析計畫，以取得調查所需的場址置性資料。

(二) 研判污染流布與污染範圍

由資料蒐集至初步現場調查完成後，調查工作人員除完成建立工廠初步的污染場址概念模式外，並已完成場址配置圖及採樣分析作業，可建立調查初期污染場址概念模式，隨著計畫土壤、地下水污染調查的完成，可進一步更新場址概念模式。將場址配置圖、地下水等水位線、污染物等濃度線與水文、地質剖面圖等予結合，可以協助研判污染流布與污染範圍，以及土壤及地下水採樣點的規劃。

(三) 提供降低或阻斷污染對環境或人體健康危害之因應措施規劃構想

於場址初步現勘、調查完成後，建立如圖 4-3 之污染源、傳輸途徑、受體之關聯圖，關聯圖可呈現場址目前、近期與可預見未來土地的使用情形，當確立污染源、傳輸途徑、受體間的關係時，且評估污染會立即或短期內對受體造成影響時，則應採取切斷污染源與受體間傳輸途徑之必要因應措施或進行整治工程，以降低污染對環境或人體健康的危害。

4.2.2 訂定土壤及地下水採樣計畫

採樣為環境分析工作第一階段，最先也是最重要的工作項目之一，所有環境介質最終檢測結果的判定，端賴採樣時是否得到代表性的樣品。土壤及地下水採樣計畫之訂定可以分成下列幾個部分。

- 一、採樣計畫「目的」之確定：採樣計畫目的之確認，可以避免不必要之採樣，進而有效的擬定採樣計畫。
- 二、現場勘察：包含現場勘察之時間、參與人員、所需工具及如何記錄等，現場勘察之判斷及所獲得之資料，可以有效降低不必要之採樣數目，降低執行計畫之費用，達到採樣目的。
- 三、採樣計畫書擬定：以現場探勘之結果，進行採樣計畫之安排及計畫書之

擬定，採樣計畫書之內容需包含採樣目的、執行及工作之內容、現場工安衛生、預期進度等部分。

四、經費需求之估算：採樣經費主要包含採樣工具購置、車輛運輸、樣品運送、樣品保存等，而這些費用會受到樣品數量及分析項目之影響。

五、簽約：確定採樣之數量，並確定採樣之進度。

六、採樣前之準備：顧問機構或環境檢驗室採樣人員之準備項目須包含採樣工具、地圖、車輛、路線安排及採樣記錄等。

七、現場採樣及前處理：進行現場採樣必須詳細記錄樣品之名稱、採樣時間、採樣人員等，所採集之樣品必須以規定加以保存(如 4°C 冷藏)，並進行必要之品管動作(如野外空白、設備空白及運送空白)，樣品之清點及移交必須確實，樣品之前處理則須注意受污染之問題。土壤及地下水採樣流程分別如圖 4-4 與圖 4-5 所示。

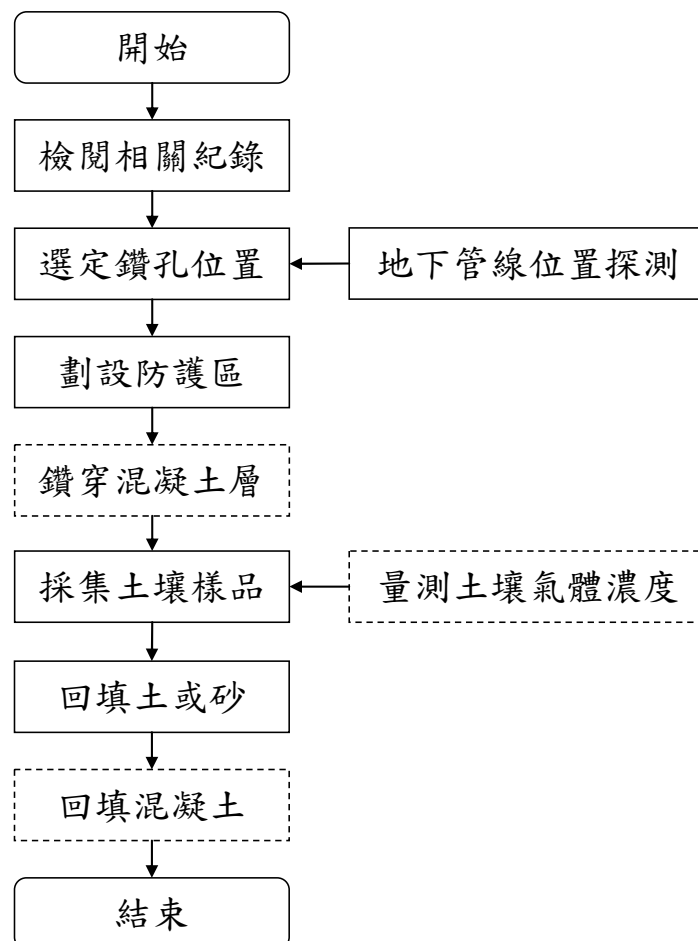


圖 4-4 土壤採樣流程

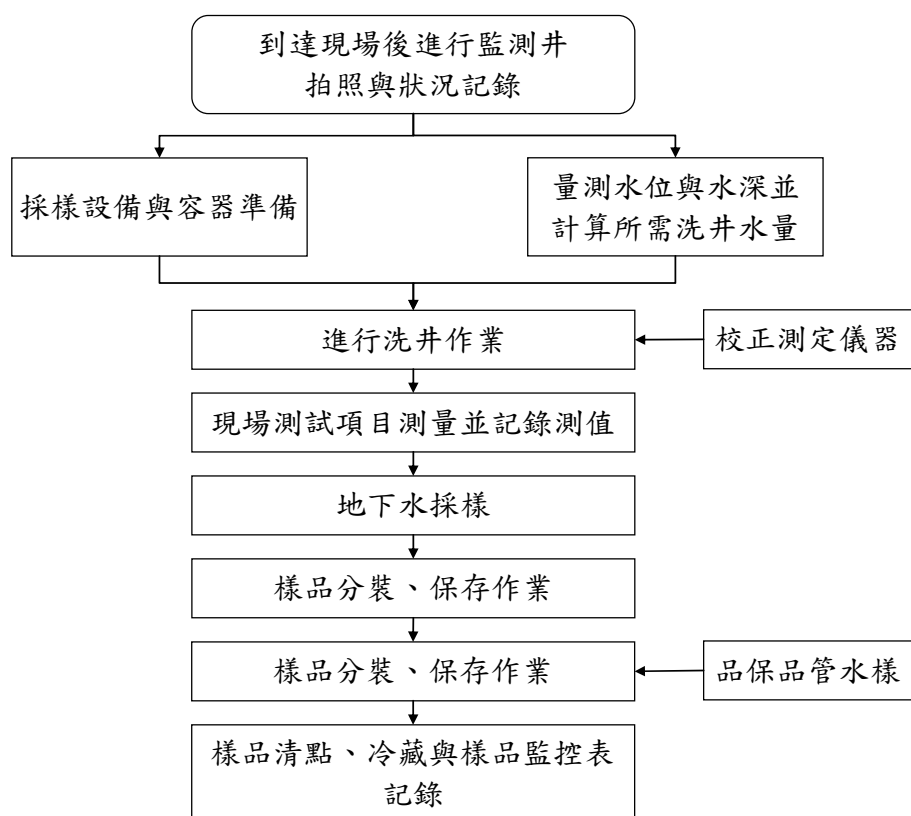


圖 4-5 地下水採樣流程^[5]

八、實驗室分析：實驗室的品保及品管程序亦是影響檢測結果最終判斷的重要工作。因此，唯有從採樣運送、接收至分析各個階段皆依據採樣計畫之品保規劃書運作，才能得到正確的檢測數據及調查結果判斷。與數據品質相關的事項包括：

- (一) 依特定目的擬定之採樣計畫。
- (二) 採集到代表性的樣品。
- (三) 樣品妥善處理及保存。
- (四) 樣品標示及交接監視紀錄。
- (五) 現場採樣之品保品管措施。
- (六) 合格人員使用適當的採樣工具。

九、數據處理與分析研判：利用品保規劃及統計分析等工具，確認分析數據之可信度。

十、撰寫調查報告書及污染評估：利用分析之結果可以評估是否達到調查目的，得知調查場址之污染情況，並依此結果進行後續工作。

4.3 土壤及地下水採樣方式與檢測方法

事業於進行土壤及地下水污染採樣與檢測時，須依據環保署公告之「土壤採樣方法」、「監測井地下水採樣方法」及「地下水水質監測井設置規範」辦理，茲就採樣工具之選擇、採樣點配置及檢測方法等，說明如下。

4.3.1 選擇採樣工具

依照採樣目的、污染物種類、採樣深度及採樣機具之不同，可以分成淺層土壤採樣、深層土壤與地下水採樣，淺層土壤採樣之深度通常小於 2 公尺，而深層土壤及地下水採樣深度則可能大於 10 公尺。

一、淺層土壤採樣工具

依環檢所「土壤採樣方法」，常用於土壤污染調查之採樣工具包括：

- (一) 採樣鏟(hand-held shovel)。
- (二) 土鑽採樣組(hand-held auger)。
- (三) 劈管採樣器(split-barrel sampler)。
- (四) 薄管採樣器(thin-walled tubes sampler)。
- (五) 活塞式採樣器(piston rod soil sampler)：利用採樣器內的活塞造成適當的真空，以採集具流動性的樣品(如湧砂)。
- (六) 雙套管採樣器(dual tube soil sampler)：具有內、外二組螺桿，內螺桿前端接採樣襯管，同時直接貫入土中，土樣即進入襯管中。

其中，常用於重金屬淺層土壤採樣調查工具為土鑽(auger)，如圖 4-6 所示，但此種工具僅限重金屬污染土壤採樣分析，土壤之採樣深度包含表土(surface soil，0~15 公分)及底土(subsurface soil，15~30 公分)，最大採樣深度(maximum reliable depth)視地質條件而定約為 2~6 公尺。



圖 4-6 土鑽採樣組及現場使用狀況

土壤採樣方法適用之地質特性及適用之污染物種類如表 4-1 及表 4-2 所示。

表 4-1 土壤採樣方法適用之地質特性^[6]

採樣方法	黏土層	粉砂層	砂層	湧砂 含水層	礫石層	一般土壤 特性
劈管採樣法	✓	✓	✓	×	○	✓
活塞式採樣法	✓	✓	✓	✓	✓	✓
雙套管採樣法	✓	✓	✓	○	○	✓
薄管採樣法	✓	○	×	×	×	○
手動採樣法	✓	✓	✓	×	○	✓

註：依採樣法的普遍性、效率與適用性程度，依序建議：✓屬「推薦使用」，○屬「適用」，×屬「不適用」。

表 4-2 土壤採樣方法適用之污染物種類^[6]

採樣方法	揮發性有機物 (VOCs)	半揮發性有機物 (BNAs)	農藥	重金屬
劈管採樣法	✓	✓	○	○
活塞式採樣法	✓	✓	○	○
雙套管採樣法	✓	✓	○	○
薄管採樣法	○	○	○	○
手動採樣法	×	✓	✓	✓

註：依採樣法的普遍性、效率與適用性程度，依序建議：✓屬「推薦使用」，○屬「適用」，×屬「不適用」。

二、深層土壤及地下水採樣鑽探設備

利用鑽機鑽孔方式進行深層土壤及地下水採樣，利用重鉋、旋鑽、氣鉋等方式鑽孔，鑽至目標深度，再利用採樣設備採集特定深度的土壤樣本，或設置臨時井、簡易井與標準井，採集地下水樣本。鑽機之選擇須考慮水文地質條件、預算、可操作空間等。各式鑽機分別敘述如下：

(一) 直接貫入鑽機(Powerprobe 或 Geoprobe)：鑽孔時不需使用循環流體，其操作狀況如圖 4-7。

1. 使用方法：以氣錘方式鑽孔，孔徑約 1.5-3 吋。
2. 適用地層：土壤粒徑小於採樣器開口直徑一半之地層皆可。
3. 深度：視地質條件而定約在 10~30 公尺。
4. 優點：土壤擾動小，樣品代表性高，如圖 4-7(b)所示。



(a)鑽機



(b)採樣套管

圖 4-7 直接貫入鑽機現場操作狀況

(二) 中空螺旋鑽機：鑽孔時不需使用循環流體，其操作狀況如圖 4-8。

1. 使用方法：以旋轉方式鑽孔，孔徑約 4-8 吋。
2. 適用地層：未飽和層。
3. 深度：視地質條件而定約在 20~30 公尺。
4. 優點：操作便利，可於中空鑽頭內直接採樣。



(a)鑽孔



(b)設井

圖 4-8 中空螺旋鑽機現場操作狀況

(三) 鑽堡：鑽孔時需使用循環流體，其操作狀況如圖 4-9。

1. 使用方法：以氣鎚及旋轉方式鑽孔，孔徑約 4-6 吋。
2. 適用地層：適用於難以鑽探地層。
3. 深度：20 公尺至 100 公尺以上。
4. 優點：動量大，速度快，以套管保護孔壁。
5. 缺點：鑽孔時需使用高壓空氣或水；機具較大，搬運成本較高，且需注意土壤交叉污染問題。



圖 4-9 鑽井現場操作狀況

三、地下水採樣設備

依 94 年 12 月 14 日環檢所修正公告之「監測井地下水採樣方法」(NIEA W103.53B)，地下水污染調查之採樣工具包括貝勒管與抽水泵。分別說明如下：

(一) 貝勒管(bailer)

貝勒管材質以鐵氟龍材質較佳。國內地下水採樣以貝勒管為採樣設備為主，現場操作狀況如圖 4.3.1-5。



圖 4-10 貝勒管現場操作狀況

(二) 抽水泵^[7]

抽水泵須為可調整抽水率並可提供穩定抽水率(0.1~0.5 L/min)，材質應不與待測物發生化學反應或吸附脫附作用，抽水時不致產生氣提、氣曝及濁度增加等現象者為宜，可選用氣囊式或離心式沉水式抽水泵。

4.3.2 採樣點配置

土壤採樣點與地下水監測井配置方式，分別說明如下：

一、土壤採樣點配置

依據場址特性、污染情況，常用的土壤污染調查之採樣點配置方式包括：主觀判斷採樣、分區採樣、系統及網格採樣、應變叢集採樣與混合採樣。各種土壤採樣配置方式之比較如表 4-3 所示。詳細規劃設計可參考環檢所公告之「土壤採樣方法」與「環境採樣規劃設計」，相關資料可於環檢所網站(網址 <http://www.niea.gov.tw>)下載。國內工廠土壤採樣以主觀判斷採樣(或環境場址評估)與系統及網格採樣之應用案例較多。

表 4-3 土壤採樣配置方式比較表

採樣方法	執行方式	適用條件
主觀判斷採樣	須由對場址狀況及欲採集樣品性質非常清楚之人員，依據專業判斷選擇採樣。	1. 小區域污染範圍或確知污染源位置。 2. 少樣品數(小於 20 個樣品)選擇性採樣。 3. 有歷史資料可供研判。 4. 供研究使用有時間及經費之限制。
簡單隨機採樣	將調查區域劃分成許多小單位，依序給於連續編號，再依亂數表隨機採樣。	1. 調查區域內污染分布均勻。 2. 樣品數至少 20 個以上。 3. 結果具統計意義。 4. 方法簡單。 5. 採樣準確度及精確度較高。
分區採樣	廢棄物污染性質明顯地分成數層，將調查區區分成數個均質小分區，以各分區面積權重分配採樣數，再進行各小區之(隨機)採樣。	1. 因土壤地質、風向或地下水等變異，造成污染物分布影響時。 2. 已充分了解污染物分布情形，其分層現象明顯。 3. 若每調查區內之差異越小，精確度越高。 4. 可求得各層之估算值。
系統及網格採樣	隨機取出第一個樣品，其後在一定時間或空間間隔下，依序取出其他樣品。	1. 污染物質任意分布或有模糊層化現象時。 2. 屬週期性或定期性採樣作業。 3. 系統/網格採樣依序採樣，故較方便。 4. 污染物分布均勻時，可得較高精確度。
應變叢集採樣	利用初步大範圍的系統調查結果，再逐步趨向高污染區作較細密的採樣，適用於界定污染範圍。	1. 可決定污染物範圍。 2. 較能專注於高污染源區域。 3. 可額外提供觀測特性，增加研究的整體價值。
混合採樣	對個別樣品等量均勻混合，再由混合樣品取出待分析樣品。	1. 綜合簡單隨機採樣及階段式採樣優點。 2. 較節省人力經費。

二、地下水監測井配置

由於標準式監測井設置費用高，無法配置太多採樣品，規劃單位視場址之地下水水文、地質特性、規劃監測井之設置分布，以充分掌握地下水污染狀況。一般工廠監測井配置方式包括，於潛在污染源(如地上型儲槽、地下儲油槽、廢水處理場、有害事業廢棄物貯存設施等)上游設置監測井，以瞭解地下水水質之背景濃度，下游監測井則以瞭解污染物洩、滲漏情形，可檢測出污染物時，則須進一步評估污染狀況，再依污染團分布情形與地質條件，規劃設置地下水監測井配置位置及設置井篩深度。地下水監測井配置範例，如圖 4-11 所示。

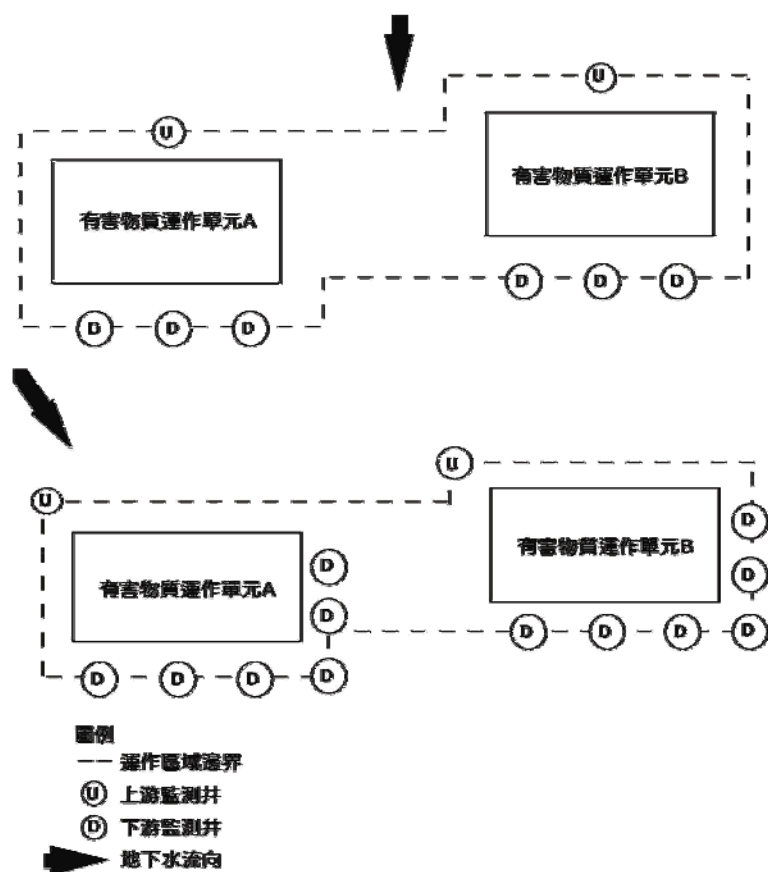


圖 4-11 工廠地下水監測井配置範例^[8]

4.3.3 樣品保存與分析方法

土壤及地下水樣品最少需要量與保存與檢測方法，可參照環檢所所公告之標準方法。茲彙整國內產業界常見之檢測項目之保存與檢測方法，分別如表 4-4、表 4-5 所示。業者在選擇相關檢測方法時，應上環檢所網站(網

址 <http://www.niea.gov.tw>)下載最新的檢測方法，以免誤用。

表 4-4 土壤及地下水樣品最少需要量與保存方法^[9,10]

檢測項目		最少樣品量	容器	保存方法	最長保存期限
土壤	砷、鎘、鉻、銅、鉛、鎳、鋅	100 g	玻璃或塑膠袋(瓶)	室溫	180天
	汞	100 g	玻璃或塑膠袋(瓶)	4 ± 2℃ 冷藏	28天
	揮發性有機物	250 g (mL)×2	250 mL直口玻璃瓶附鐵氟龍墊片	4 ± 2℃ 冷藏	14天(採樣至分析)
	半揮發性有機物	250 g (mL)×2	250 mL直口玻璃瓶附鐵氟龍墊片	4 ± 2℃ 冷藏	14天(採樣至萃取)、40天(萃取至分析)
地下水	一般金屬(鎘、鉻、銅、鉛、鎳、鋅)	200 mL	以 1+1 硝酸洗淨之塑膠瓶	加硝酸使水樣之pH<2。(若測定溶解性金屬，須於採樣後立刻以 0.45μm之薄膜濾紙過濾，並加硝酸使濾液之pH<2)。加酸後之水樣應貯藏於 4±2℃ 下。	180天
	砷	—	以 1 + 1 硝酸洗淨之塑膠瓶	水樣於採集後應立即添加濃硝酸使水樣之pH <2。	180天
	六價鉻	300 mL	塑膠瓶	暗處，4℃ 冷藏。	24小時
	汞	500 mL	預先以低汞含量濃硝酸或超純濃硝酸(1+1)溶液洗淨之下列容器： 1. 石英或鐵氟龍(TFE)。 2. 聚丙烯或聚乙烯材質且具聚乙烯蓋之容器。 3. 硼矽玻璃材質之容器。	添加濃硝酸使水樣之 pH 值小於 2，加酸後之水樣宜貯藏於約4℃。或每1L 水樣中添加2 mL含20 % (W/V)重鉻酸鉀之低汞含量濃硝酸或超純濃硝酸溶液(1：1)，並置於無污染之冷藏庫(4℃)中保存。	若水樣中含數mg/L濃度之汞時，其保持穩定之期限為35天，但當水樣中汞濃度僅為0.001 mg/L範圍時，應於採樣後儘速分析。
	揮發性有機物	1,000 mL	以褐色玻璃瓶或以鋁箔紙包裹等避光方式處理之玻璃瓶盛裝樣品，並須附鐵氟龍內墊之蓋子。	不得以擬採之水樣預洗，加鹽酸使水樣之pH < 2，裝樣後不得含有氣泡，暗處，4℃ 冷藏，若水樣中含有餘氯，則於每瓶水樣中添加 25 mg 抗壞血酸。	14 天
	半揮發性有機物	40 mL ×2	以褐色玻璃瓶或以鋁箔紙包裹等避光方式處理之玻璃瓶盛裝樣品，並須附鐵氟龍內墊之蓋子。	不得以擬採之水樣預洗，暗處，4℃ 冷藏(若水樣中含有餘氯，則需添加80 mg 硫代硫酸鈉/L)。	水樣應於 7 天內完成萃取，萃取後 40 天內完成分析。

註：請上環檢所網站(網址 <http://www.niea.gov.tw>)，查閱最新公告之檢測方法。

表 4-5 土壤及地下水檢測方法^[11]

檢測類別	檢測項目	檢測方法
土壤	鎘、鉻、銅、鎳、鉛、鋅	- 土壤中重金屬檢測方法－王水消化法(NIEA S321.63B) - 石墨爐式原子吸收光譜法(NIEA M113.00C) - 火焰式原子吸收光譜法(NIEA M111.00C) - 感應耦合電漿原子發射光譜法(NIEA M104.01C)
	汞	- 土壤中總汞－冷蒸氣原子吸收光譜法(NIEA M317.01C) - 感應耦合電漿原子發射光譜法(NIEA M104.01C)
	砷	- 土壤中砷檢測方法－砷化氫原子吸收光譜法(NIEA S310.62C) - 石墨爐式原子吸收光譜法(NIEA M113.00C) - 火焰式原子吸收光譜法(NIEA M111.00C) - 感應耦合電漿原子發射光譜法(NIEA M104.01C)
	土壤污染管制標準之 20 項有機化合物管制項目(不含 TPH)	- 揮發性有機物檢測方法－氣相層析質譜儀偵測法(NIEA M711.01C) - 半揮發性有機物檢測方法－毛細管柱氣相層析質譜儀法(NIEA M731.00C)
	總石油碳氫化合物(TPH)	土壤及事業廢棄物中非鹵有機物檢測方法－氣相層析儀/火焰離子化偵測法(GC/FID) (NIEA M611.02C)
地下水	鎘、鉻、銅、鎳、鉛、鋅	- 水中金屬檢測方法－石墨爐式原子吸收光譜法(NIEA W303.51A) - 水中銀、鎘、鉻、銅、鐵、錳、鎳、鉛及鋅檢測方法－火焰式原子吸收光譜法(NIEA W306.52A) - 水中金屬及微量元素檢測方法－感應耦合電漿原子發射光譜法(NIEA W311.51B)
	六價鉻	水中六價鉻檢測方法－APDC 整合 MIBK 萃取原子吸收光法(NIEA W321.51A)
	汞	水中汞檢測方法－冷蒸氣原子吸收光譜法(NIEA W330.52A)
	砷	- 水中砷檢測方法－自動化連續流動式氫化物原子吸收光譜法(NIEA W434.53B) - 水中砷檢測方法－批次式氫化物原子吸收光譜法(NIEA W435.52B)
	苯、甲苯、萘、四氯化碳、氯苯、氯仿、氯甲烷、1,4-二氯苯、1,1-二氯乙烷、1,2-二氯乙烷、1,1-二氯乙烯、順 1,2-二氯乙烯、反 1,2-二氯乙烯、四氯乙烯、三氯乙烯、氯乙烯	- 水中揮發性有機物檢測方法－吹氣捕捉-填充管柱氣相層析法(NIEA W780.50T) - 水中揮發性有機化合物檢測方法－吹氣捕捉毛細管柱氣相層析法／串聯式光離子化偵測器及電解導電感應偵測器檢測法(NIEA W784.51C) - 水中揮發性有機化合物檢測方法－吹氣捕捉/氣相層析質譜儀法(NIEA W785.54B) - 水中半揮發性有機化合物檢測方法－氣相層析質譜儀法(NIEA W801.50B)
	總酚	水中總酚檢測方法－分光光度計法(NIEA W521.52A)

註：請上環檢所網站(網址 <http://www.niea.gov.tw>)，查閱最新公告之檢測方法。

4.4 快速篩試工具之應用

美國環保署於 1998 年推動以績效為評估基準之檢測系統(performance based measurement system, PBMS)，期使檢測方法選擇具有變通性，加速新的檢測技術之核准，以及發展及使用具經濟效益之方法。^[12] 快速篩試工具與傳統調查評估不同，其特色包括：

- 一、應用快速篩試工具進行的場址評估工作，規劃後，在單一次的行動中(可能數小時至數日)，完成所有的調查工作。
- 二、所有檢測數據均於現場執行與產生，並且於現場進行解讀。
- 三、採樣與檢測方法具備彈性，可於現場進行必要的變動。

茲就國內重金屬及揮發性有機污染物調查，較常用的快速篩試工具，分別介紹如下。

4.4.1 重金屬快速篩試方法

國內傳統重金屬檢測大都藉由傳統實驗室檢測方法，其分析雖相當準確，但相對的也較昂貴、耗時，自 2004 年以來，美國環保署就 10 餘種土壤重金屬污染現地檢測技術提出驗證報告^[13,14,15]，該等現地檢測技術可在短時間內於現地測得的數據，除可初步篩選及判斷高污染區外，亦可應用於整治階段，快速瞭解整治情形，如業者欲在短時間內，過濾篩選大面積土壤品質時，可考量應用該等技術。茲就重金屬快速篩試技術中，曾在國內應用之 X 射線螢光偵測器(X-ray fluorescence，以下簡稱 XRF)與直接汞分析儀(direct mercury analyzer, DMA)等 2 項重金屬污染土壤現地檢測法，介紹如下：

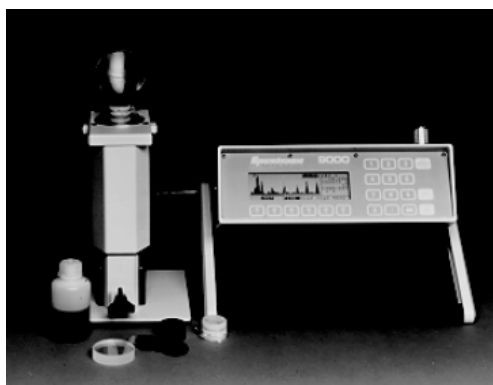
一、X 射線螢光偵測器(XRF)

XRF 之原理為利用 X-光束照射經前處理後之土壤，激發土壤中重金屬原子，當原子自激發態回到基態時，偵測所釋放出來的螢光，經由分光儀分析其能量與強度後，可提供土壤中重金屬元素種類與含量，具有快速、非接觸、非破壞性及多元素分析等特點。美國使用之各式攜帶式 XRF 如圖 4-12 所示，包括 TN Spectrace 9000、Metorex X-MET 2000、NITON XLi/XLt-700、Scitec MAP Spectrum Analyzer 等。該等 XRF 製造廠，原設計 XRF 係為偵測油漆中的重金屬鉛，之後，再研究改良 XRF 偵測其他重金屬，為偵測不同重金屬物質，不同型式 XRF 機型，一般會使用一種以上的放射源，如 Fe-55、Cd-109、Am-241 或 Cm-244。其中，NITON 公司所生產之 XL 系列 XRF 為國內土壤污染調查作業中較常使

用之機型，以 NITON XL 700S 為例，其所使用的放源為 Fe-55、Cd-109、Am-241。

針對我國土壤及地下水污染管制法所管制之重金屬項目，XRF 在無干擾物情形下，其偵測極限如表 4-6 所示。XRF 偵測極限受重金屬種類、偵測器型式、放射源種類及放射源強度、測量時間、基質(如土壤或沉積物)物化特性及原子間光譜等之影響，特別是基質樣品之同質性(homogeneity)對檢測數據的影響最為顯著。一般而言，經數值迴歸分析(regression analysis)後，重金屬 XRF 檢測數據與相關實驗室檢測數據之相關係數，砷、銅、鉛、鋅為 0.90 以上，鉻為 0.70 以上，一般 XRF 之檢測數據會高估鉻濃度之情形。

環檢所於 95 年 1 月 18 日公告「土壤和底泥中元素濃度快速篩選方法—攜帶式 X-射線螢光光譜儀分析法」(NIEA S322.60C)，並於 95 年 4 月 15 日起實施。



(a) TN Spectrace 9000



(b) Metorex X-MET 2000



(c) NITON XLi/XLt-700



(d) Scitec MAP Spectrum Analyzer

圖 4-12 各型攜帶式 X 射線螢光偵測器^[16]

表 4-6 XRF 重金屬偵測極限與我國土壤污染監測基準與管制標準

重金屬項目	XRF 偵測極限 ^[17,18] (mg/kg)	土壤污染監測基準 (mg/kg)	土壤污染管制標準 (mg/kg)
砷	40	30	60
鎘	100	10(食用作物農地之監測基準值為 2.5)	20(食用作物農地之監測基準值為 5)
鉻	150	175	250
銅	50	220(食用作物農地之監測基準值為 120)	400(食用作物農地之監測基準值為 200)
汞	30	10(食用作物農地之監測基準值為 2)	20(食用作物農地之監測基準值為 5)
鎳	50	130	200
鉛	20	1,000(食用作物農地之監測基準值為 300)	2,000(食用作物農地之監測基準值為 500)
鋅	50	1,000(食用作物農地之監測基準值為 260)	2,000(食用作物農地之監測基準值為 600)

二、直接汞分析儀(DMA-80)

DMA-80 直接汞分析儀(如圖 4-13)之原理為樣品經乾燥及熱脫附後，使汞從樣品中釋出，熱脫附後之產物經流動氧氣流送至觸媒還原反應器後，被氧氣流載送至含金汞齊器(amalgamator)，其中汞即可被選擇性地補集。接著快速升溫，以放出汞蒸氣，攜帶汞蒸氣的氧氣流最後通過單一波長原子吸收光譜儀光徑上之吸收槽，由 253.7 nm 波長之吸收值(波峰高度或面積)偵測樣品中汞的濃度。



圖 4-13 DMA-80 汞分析儀(圖片來源：Milestone 公司網站)

DMA-80 直接汞分析儀為符合美國環保署標準方法 Method 7473，以及符合環檢所「固體與液體樣品中總汞檢測方法－熱分解汞齊原子吸收光譜法(M318.00C)」方法之檢測儀器。DMA-80 直接汞分析儀適用於分析實驗室與野外環境中固體、液體樣品中汞的檢測，可在無需樣品化學前處理情況下，偵測土壤、底泥、底部沉積物、污泥類物質、廢液、地表水、地下水、生物組織中之總汞(有機和無機)的含量。

4.4.2 揮發性有機物快速篩試方法

對於地下環境揮發性有機物(VOC，如含氯化有機物及石油碳氫化合物)污染，土壤氣體調查為快速及具成本效益的篩試技術。高蒸氣壓、低溶解度之揮發性有機物，因其物化特性之不同，對土壤及地下水造成不同程度的污染，存於土壤孔隙間的氣相揮發性有機物含量，亦有所不同。藉由採集、檢測污染場址內淺層(約地下 1~7 公尺內)土壤孔隙間的氣體，有助於瞭解污染物的存在、成分、洩漏的形式與污染團範圍。土壤氣體調查的優點，是可對場址進行較全面性的採樣，以較低精密的即時偵測儀器降低分析費用，及於短時間內取得大量分析數據，以達到污染場址調查的不確定性。適當地運用土壤氣體調查結果，有利於後續調查土壤採樣點與地下水監測井位置的選取。

一、原理

地下環境中的揮發性有機污染物，應能形成由主要污染源濃度高、往外濃度低的濃度梯度。此外含水層(飽和層)中的揮發性有機物，須具有經毛緣層(capillary fringe)，向上傳輸至透氣層(未飽和層)土壤中，其氣相可存在於土壤孔隙中，而被檢測出來之特性。土壤氣體中的揮發性有機物濃度，與其在地下水中的濃度、水溶解度、土壤、地質及蒸氣壓等因素有關。

理想上，由污染地下水或土壤向上傳輸至地面的揮發性有機物，在土壤氣體中的濃度，其垂直向濃度梯度，向上濃度愈低；水平向濃度梯度，則形成由污染源濃度高、水平往外濃度低的情形。在許多案例中，透氣層內的土壤氣體濃度梯度，會因水文及地質的變異性(如暫棲水、不透水層)而扭曲，且在水文或地質障礙物周圍發現揮發性有機物氣體。此外，地下環境的化學與生物降解性，亦會影響揮發性有機物在土壤孔隙中的分布及移動狀況。有關土壤氣體在不同地下環境的濃度分布狀況如圖 4-14 所示。

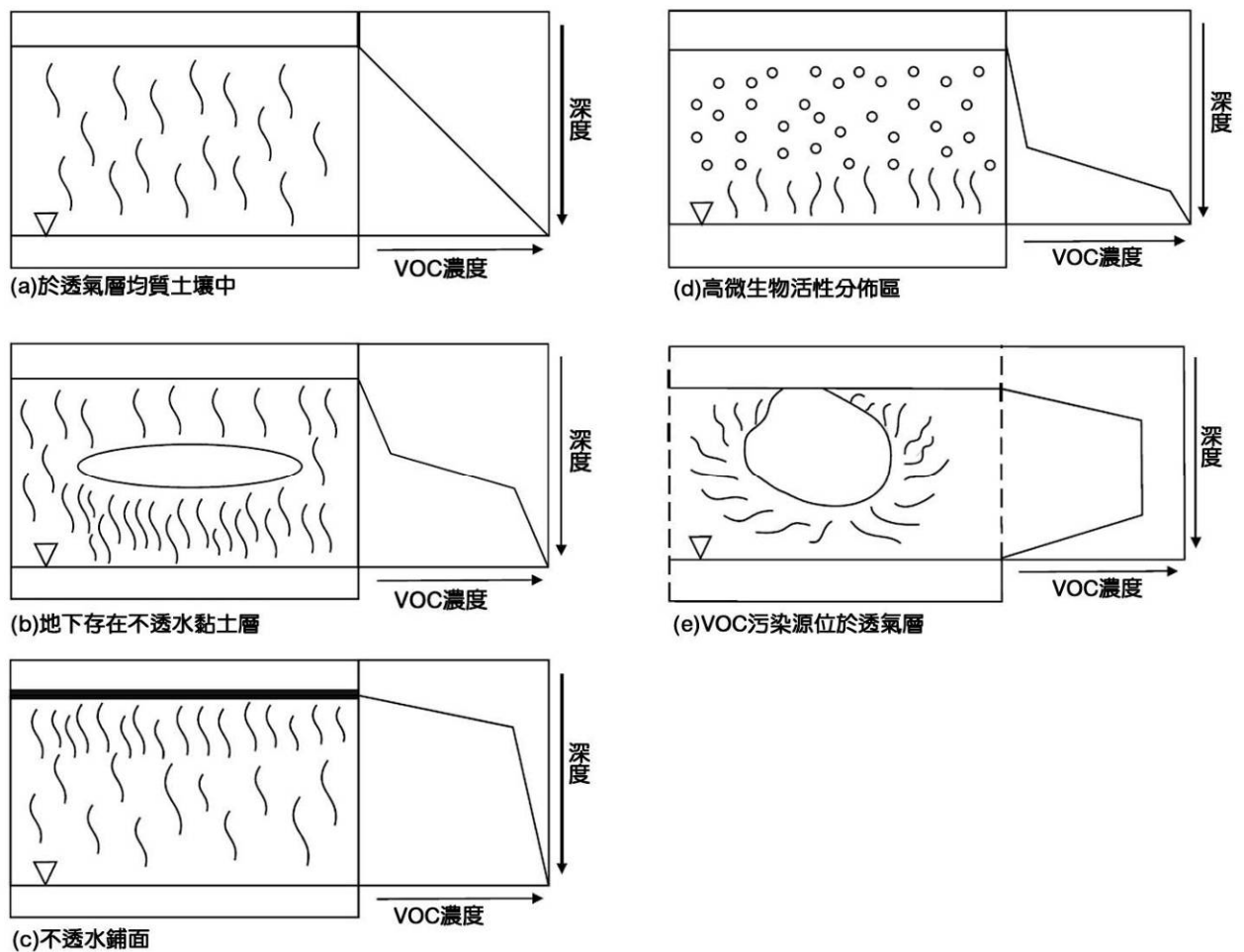


圖 4-14 不同地下環境之揮發性有機物濃度梯度^[19]

二、適用之場址條件

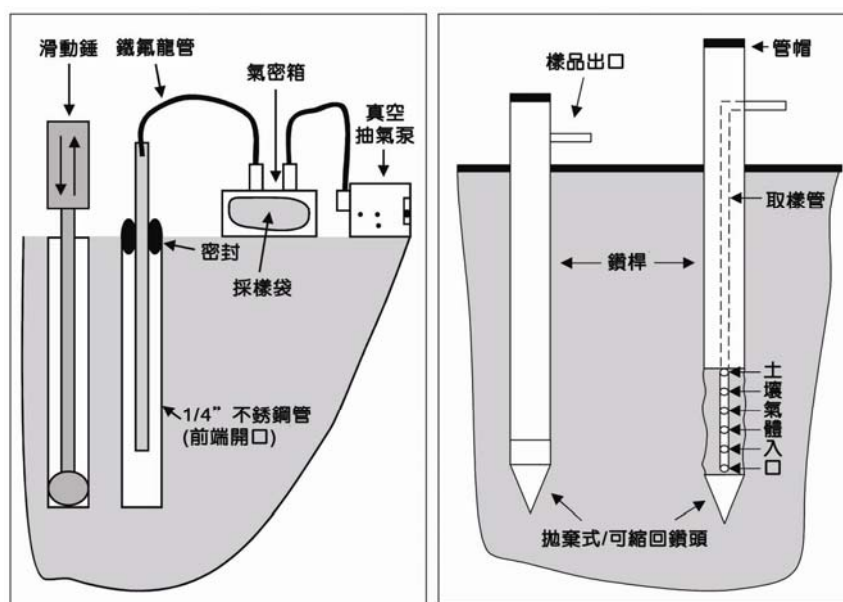
一般適用被動式土壤氣體採樣之場址條件如下：

- (一) 蒸氣壓 $> 1 \text{ mmHg @ } 20^\circ\text{C}$ 。
- (二) 亨利常數 > 1 或 $0.05 \text{ kPaM}^3/\text{mole}$ 。
- (三) 土壤水分或飽和度 $< 80\%$ 。
- (四) 採樣區域地質非屬黏土特性。

三、採樣方法

國內常見的採樣方法係將土壤氣體由探測管或土壤氣體監測井中抽出，直接以偵測器進行檢測，或抽至採樣袋(如 Tedlar bag)送實驗室分析。探測管的型式可分為 2 種，一為被動設置探測管(passive placed

probe，如圖 4-15(a))，另一為貫入式探測管(drive ground probe，如圖 4-15(b))。被動設置探測管的設置先以短管螺旋鑽具(bucket auger)或滑動鉋鑽洞，再將探測管置入鑽洞中，管口以不透水材質密封，採樣時再將採樣管插入，國內較少採用。貫入式探測管則是先將鐵氟龍管或可拋式 PE 材質管與開孔的鑽桿連接，以滑動鉋、電動鉋或鑽機將採樣鑽桿貫入至預定採樣深度後，再將鑽桿往上拉約 3~5 公分，拋棄式鑽頭會與鑽桿脫離，而使鑽桿下方開孔外露，可縮回鑽頭則會露出土壤氣體入口，為國內較常採用的土壤氣體採樣方式。



(a)被動設置探測管

(b)貫入式探測管

圖 4-15 土壤氣體探測管類型^[19]

四、攜帶式分析儀器

土壤及地下水污染調查常用的攜帶式分析儀器有光離子偵測器(photoionization detector, PID)、火焰離子偵測器(flame ionization detector, FID)與攜帶式氣相分析儀(portable gas chromatographs)，常見各式儀器如圖 4-16 所示。茲分別說明如下：

(一) 光離子偵測器與火焰離子偵測器

1. 光離子偵測器(PID)

光離子偵測器以紫外光將有機氣體分子游離並產生離子，利用不同氣體特定的游離能和游離效率，偵測化合物游離後所產生的電流大小，可加以定量。不同氣體的游離能不同，可更換紫外光燈以獲得對氣體之選擇性，但鑑別力有限，亦無法確實定性。以光離子

偵測器 HNU 為例，該型光離子偵測器可提供 9.5 eV、10.2 eV 與 11.7 eV 之光源，該等光源均可偵測出許多芳香族化合物與大分子量碳氫化合物，其中 10.2 eV 與 11.7 eV 的偵測器可以偵測出較小分子的有機物與含鹵素碳氫化合物。而在環境調查工作上，以 10.2 eV 光源較為有用，因較 11.7 eV 光源耐用，而較 9.5 eV 光源可偵測出較多的有機氣體分子。^[20]其缺點是不易偵測出低分子量的氣體(如甲烷、乙烷)，且易受溼度影響。

2. 火焰離子偵測器(FID)

火焰離子偵測器是採用氫火燄將有機氣體離子化，藉由自由離子所造成的電流(稱為儀器反應)與樣品中的揮發性化合物濃度成正比的相對關係加以量測。火焰離子偵測器對大多數的有機蒸氣均能產生明顯的反應，且對於脂肪族或直鏈碳氫化合物特別敏感，因為這些化合物比芳香族(或環狀)碳氫化合物的燃燒效率高。火焰離子偵測器一般是利用甲烷進行校正。



參考資料：Thermo Electron Corporation，Photovac，Inc. 與 PID Analyzer，LLC。

(a) 光離子偵測器(PID)與火焰離子偵測器(FID)



參考資料：Varian，Inc.，Electron Sensor Technology，Photovac，Inc. 與 Inficon。

(b) 可攜式氣相層析儀

圖 4-16 各式攜帶式土壤氣體分析儀器^[21]

(二) 可携式氣相層析儀

氣相層析是一種物理分離的技術，樣品由載流氣體(carrier gas，如氮、氫、氦)帶動，通過一個分離用的管柱(柱為一長薄且纏繞成線圈狀的管路)，可將污染物分離開來，氣流離開管柱後，進入可產生反應訊號的偵測器(如 FID、PID 或電子捕捉偵測器(ECD))，偵測器反應訊號經由記錄器與電腦予以記錄與顯示，建構一組層析圖譜(亦即偵測器反應對樣品的滯留時間)，圖譜中每個反應波峯(response peak)的積分面積與該污染物的濃度成正比，污染物組成的鑑別，係利用與標準品之滯留時間比對加以判斷。藉由管柱與偵測器的選擇，可針對特定的關切污染物進行分析，其靈敏度較光離子偵測器與火焰離子偵測器高，但成本與分析費用亦相對較高。

4.5 土壤及地下水污染調查案例介紹

以下分別就國內快速篩試、土壤污染調查、土壤及地下水污染調查案例，介紹說明如下。

4.5.1 快速篩試案例介紹

一、X 射線螢光偵測器調查案例^[22,23]

本調查案例係依國內歷年農地土壤重金屬污染調查結果，選取其中超過農地土壤重金屬含量五級標準之 2 公頃農地，調查農地主要污染物為銅、鋅、鉛與鎳，調查人員以手動式採土器於現地採集不同水平及垂直佈點位置的土壤，將土壤樣品置入夾鏈袋內，以 XRF 先行進行偵測工作，總計偵測 176 個土壤樣品，並從中選擇 XRF 檢測值最高之 40 個樣品，送實驗室以王水消化法進行全量分析工作。檢測結果顯示，XRF 儀器檢測數據與土壤性質、量測時間及重金屬的種類有關；隨著測試時間增加，設備偵測限值可有效降低至一穩定值；銅、鋅、鉛與實驗室分析結果有較佳之相關性，線性迴歸 R^2 值分別為 0.989、0.974 及 0.927，鎳並無一定關係存在。調查結果顯示，汞偵測時間為 60-70 秒之偵測極限為 13 mg/kg，偵測時間為 110-130 秒之偵測極限為 10 mg/kg。

此外，彰化縣農地土壤重金屬污染控改善計畫，亦曾利用 XRF 檢測受污染土壤。該計畫農地主要受重金屬鉻銅鋅鎳污染，整治單位將 30 個土壤樣品分別由 XRF 與實驗室 ICP 方法進行分析比較，由檢測結果發現，土壤中銅與鋅二種重金屬之相關性極高，線性迴歸 R^2 值分別為

0.987 及 0.997；而鉻及鎳之相關性極低， R^2 值分別為 0.112、及 0.196。

二、直接汞分析儀調查案例^[24]

台北市某土壤汞污染整治場址，場址面積約 3 公頃，86 年 2 月發現該場址受重金屬汞污染，最高污染濃度 504.1 mg/kg。整治單位於 89 年 7 月 25 日提出整治計畫書，同年 8 月 9 日，監督小組同意以熱脫附處理法進行場址整治工作，90 年 11 月正式進行整治。

整治單位為確保每日受污染土壤熱脫附處理之成效，以 DMA-80 直接汞分析儀進行每日處理前、後採樣分析工作，並配合整治計畫書每處理 100 m³ 污染土壤之驗收作業，經執行小組採樣後，由整治單位分樣送合格檢測機構進行土壤樣品分析(檢測方法 NIEA M317.00C)，以確保熱脫附系統之處理成效。土壤處理後月平均濃度以 DMA-80 直接汞分析儀檢測結果介於 0.15~8.42 mg/kg 之間，檢測機構檢測結果介於 0.02~7.62 mg/kg 之間。其中，91 年 5 月 7 日樣品檢測結果，環保局重金屬汞之檢測數據為 4.41 mg/kg，DMA-80 為 4.18 mg/kg，而整治單位委託之檢測機構之檢測數據為 0.02 mg/kg。由於 DMA-80 檢測結果與檢測機構之相關性極高，整治單位於 92 年 1 月後，改採由 DMA-80 直接汞分析儀之數據，做為內部處理成效之稽核依據。

三、土壤氣體現場篩試方法調查污染場址案例^[25]

90 年底，桃園縣大溪鎮某加油站經檢舉，疑似漏油造成當地水源污染，環保單位遂於場址內及鄰近地區，進行土壤及地下水調查工作，經瞭解場址之污染狀況，評估可能污染範圍已隨地下水流擴散至加油站外。環保署委託工研院於場址南方坡崁地區(不含鄰近道路路面及建築物區)，於地表鑽鑿深度介於 1~1.5 公尺間之小孔，再抽取孔內氣體，使用 PID 測定土壤內油氣濃度，經將濃度特別高的採點剔除後，等濃度分布如圖 4-17 所示。調查結果顯示，調查區域內有 2 處高濃度區(圖 4-7 分別標示為 A 及 B)，其中 A 距離場址約 200 公尺處，另 B 位於場址外約 400 公尺處，位於省道台三線與縣 83 號道路間，推測油水自山壁滲出，成為地表逕流並向地形低處匯流，在地表流動之同時，滲入地表下，再隨著地下水流動方向繼續擴散。

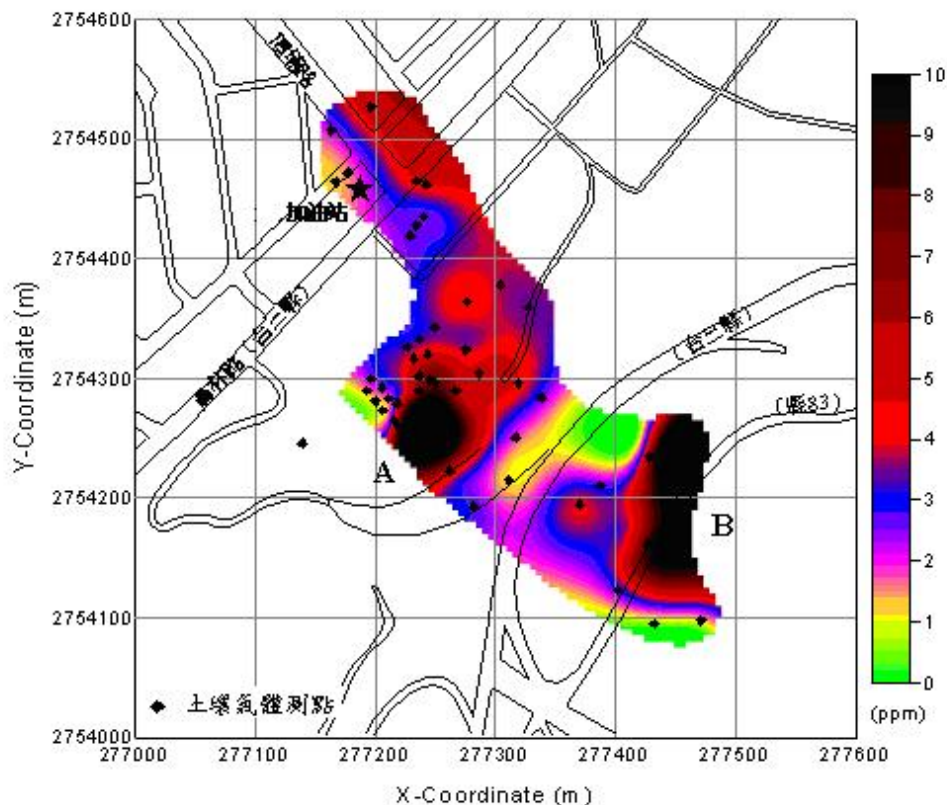


圖 4-17 國內某加油站鄰近地區土壤氣體調查結果^[25]

4.5.2 土壤污染調查案例介紹^[26]

台南市某明膠工廠於 91 年 9 月經民眾陳情本場址旁窪地有污染狀況，環保署南區督察大隊爰於 91 年 9 月 26 日前往稽查，勘查時發現堆肥醱酵池有惡臭逸散大氣，且廢皮露天棄置窪地，現場並無適當防制措施，南區督察大隊遂依空污法第 31 條及廢清法第 36 條告發。

91 年 12 月初又有民眾陳情本場址北側窪地疑似有堆置廢棄物，致有重金屬污染周圍魚塢情事，環保署於 91 年 12 月 4 日通知顧問公司於 91 年 12 月 5 日會同環保署土污基管會現場勘查，並協助進行採取現場堆肥物（疑似廢棄物），並進行土壤採樣及檢驗工作，採樣點詳圖 4-18，採樣原則說明如下：

- 一、本場址負責人稱堆肥池鋪設有 RC 鋪面，深度約 180 公分，惟該堆肥已久未檢驗，採樣人員於該處採取約 1 公斤污泥(樣品編號為廢-1)，依事業廢棄物毒性特性溶出程序(TCLP)分析，分析項目為重金屬、pH 值及含水率，重金屬分析項目包括汞、鉛、鎘、鉻、六價鉻及砷。

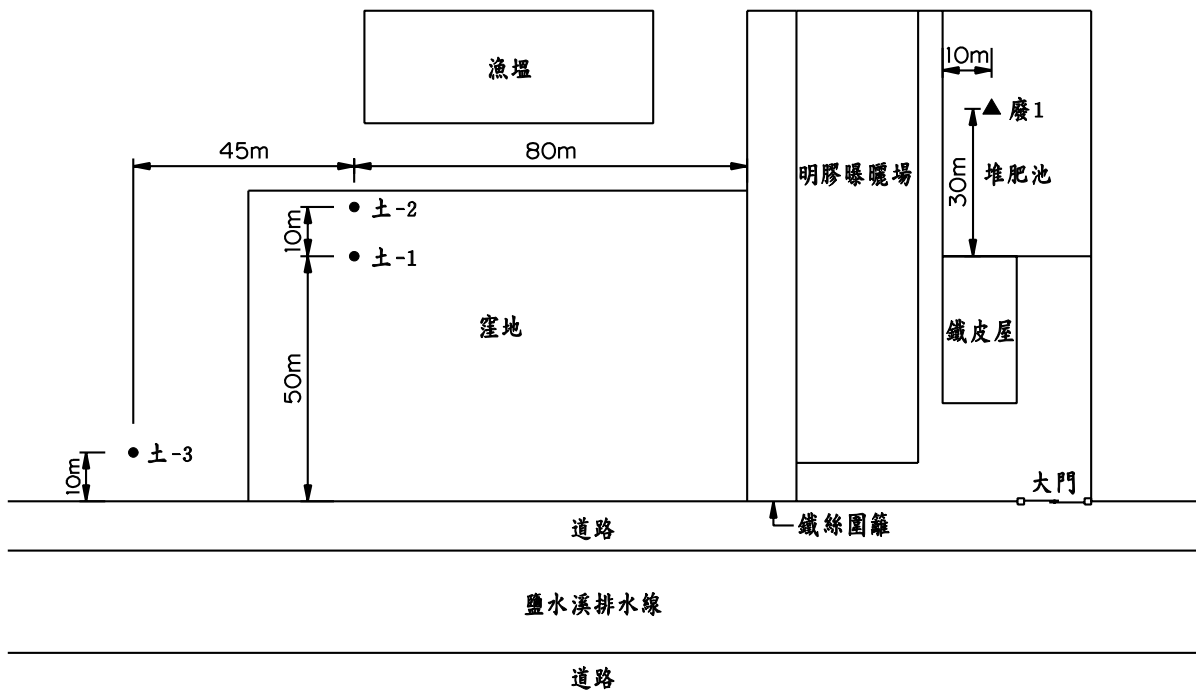


圖 4-18 台南市某明膠工廠周圍使用狀況及採樣位置示意圖^[26]

- 二、依民眾陳情疑似污染源為場址東北側，堆置堆肥成品之窪地，經勘查後發現該窪地地表為堆肥物與土壤混合物，故於該窪地以混樣取 1 點土壤(樣品編號為土-1，以 5 點混樣)，另窪地近魚塭處(目視為原土)亦以混樣取 1 點土壤(土-2，以 5 點混樣)，兩者採樣深度均為表土 0 ~ 15 公分，分析項目為土壤中汞、砷、銅、鎘、鉛、鋅、鉻、鎳等重金屬及 pH、含水率等。
- 三、為瞭解背景土壤重金屬含量，採樣人員另於距窪地約 45 m 處另採集表土背景土壤 1 點(樣品編號為土-3，以 5 點混樣)，分析項目則同前土-1 及土-2 樣品所述。

檢驗結果顯示該場址堆肥池內堆肥物以 TCLP 進行重金屬檢測之結果均未超過有害事業廢棄物認定標準；惟窪地內之土壤樣品鉻含量超過土壤污染管制標準。環保署另於 92 年 11 月 17 日再至該場址再進行土壤及廢棄物檢測分析，分析結果顯示堆肥物堆置區開挖部分之土壤之鉻濃度 1,100 mg/kg 超過土壤污染管制標準 250 mg/kg，顯示該地區土壤已遭鉻金屬污染。

4.5.3 土壤及地下水污染調查案例介紹^[27]

國內某鋅鋁熔煉業以再生鋅合金錠與再生鋁合金錠之生產與銷售為主，製程係收集國內某單一廢金屬及自國外進口經篩選過的汽車切片中廢鋅、廢鋁混合料，再自其中用人工及重質液浮選法再度篩選出廢鋅、廢鋁加以重新熔煉，澆鑄再生鋅合金錠、鋁合金錠。

該廠潛在污染物質以重金屬為主，另於製程大消耗之鍋爐用燃料，為另一潛在污染源。環保署於 94 年 3 月進行土壤及地下水污染調查，調查重點包括地下儲槽、廢棄物堆置區、廢棄物貯坑、廢水處理設施、油漬污染區等。土壤樣品分析項目包括重金屬、總石油碳氫化合物(TPH)，重金屬採表土，TPH 採深層樣品，另依現場 PID、FID 讀值及污染情形研判取樣深度；地下水分析項目包括重金屬、揮發性有機物(VOCs)、總酚與總有機碳(TOC)。

檢測結果，土壤鉻、鉛、鎘、銅、鋅、鎳與 TPH 濃度超過管制標準，顯示廢棄槽污染土壤及地下水，因疑似集塵灰污染土壤。環保署遂於 94 年 6 月間進行第 2 次調查。第 2 階段採樣規劃如下：

- 一、地下油槽及週邊空地面積約 525 平方公尺，以 15 公尺 × 15 公尺網格方式佈點。
- 二、原鋁製程區及辦公室間區域約 300 平方公尺(長約 60 公尺、寬約 5 公尺)，以 5 公尺×20 公尺長方形網格方式佈點。
- 三、成品倉庫及周邊空地區域約 3,000 平方公尺平均佈點。

第 2 階段依據第 1 階段異常位置向四週進行補充調查，結果顯示未有污染情形，經研判該污染物主要為關廠後，廢棄物未妥善處理所致，污染並未擴散。

4.6 專業機構聘請

土壤及地下水污染調查所需執行的工作及涉及的專業相當複雜，需要有足夠的教育訓練與工作經驗，以及具有相關法令規定、環境科學與技術、商業營運的技術與環境考量、設施運作與評估技巧等知識與能力。因此，工廠可考慮聘請在此領域有專長及經驗之專職顧問、學者、工程顧問公司與檢驗公司協助，或共同組成專業調查團隊。

專業機構的工作項目，包括：

- 一、進行場址現場勘察或環境場址評估。
- 二、規劃及撰寫土壤及地下水污染調查評估方案或採樣計畫。
- 三、執行現地鑽探並採集土壤及地下水樣品。
- 四、地下水水質監測井設置及定期維護。
- 五、由環保署認可之檢驗機構進行分析。
- 六、撰寫土壤及地下水調查評估及樣品分析檢測報告。
- 七、評估土壤及地下水污染情形，以及評估污染潛勢。
- 八、水文地質調查與建立水文地質模式。
- 九、人體健康風險評估。
- 十、提供工廠人員教育訓練。

學者專家之聘請需考慮其專長、專業之領域範圍及從事相關工作之經驗等，可以由環保署(網址：<http://atftp.epa.gov.tw/scholar>)、行政院國家科學委員會(網址：http://nscnt07.nsc.gov.tw/WRS/personal_search.asp)或是行政院公共工程委員會(網址：<http://plan3.pcc.gov.tw/expert/new>)查詢相關之資料，該等網站中，可查詢學者專家之服務單位、學歷與專長等資料，業者可再透過學者專家的服務單位，進一步與學者專家取得聯繫的方式。

委託工程顧問公司及檢測機構進行土壤或地下水的調查需考慮其相關工作之經驗及執行成果，可以由環檢所網站(網址：<http://niea.epa.gov.tw>)查詢合格檢測機構之基本資料；或透過地方主管機關或台灣土壤及地下水環境保護協會(網址：<http://www.tasgep.org.tw/home.htm>)查詢或洽詢相關之資料；或利用行政院公共工程委員會「政府電子採購網」站(網址：<http://web.pcc.gov.tw>)，查詢「政府採購資料公告系統」之決標公告，可取得得標廠商名稱、廠商地址、與廠商電話等資料。

參考文獻

1. 環檢所，環境採樣規劃設計，民國 94 年 7 月 30 日。
2. 張西龍、吳一民，土壤及地下水污染調查原則與實務介紹，台灣土壤及地下水環境保護協會簡訊第 18 期，民國 95 年 1 月 10 日。
3. UK Environment Agency, Groundwater Protection： Policy and Practice Part 2 – Technical Framework.
4. USACE Engineer Manual, Conceptual Site Models for Ordnance and Explosives (OE) and Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste (HTRW) Projects (EM 1110-1-1200), February 3, 2003.
5. 環檢所，監測井地下水採樣方法(NIEA W103.53B)，民國 95 年 3 月 15 日。
6. 環檢所，土壤採樣方法(NIEA S102.61B)，民國 94 年 11 月 30 日。
7. 陳家洵，微洗井採樣方法簡介，台灣土壤及地下水環境保護協會簡訊，第 15 期，民國 94 年 5 月 4 日。
8. USEPA RCRA, Superfund & EPCRA Call Center Training Module - Introduction to： Groundwater Monitoring (40 CFR Parts 264/265, Subpart F), EPA530-K-02-010I, October 2001.
9. 環檢所，土壤檢測方法總則(NIEA S103.60C)，民國 91 年 1 月 17 日。
- 10.環檢所，水質檢測方法總則(NIEA W102.51C)，民國 94 年 6 月 15 日。
- 11.環檢所網站(網址 <http://www.niea.gov.tw>)。
- 12.Federal Register Notice, Waste Management System; Testing and Monitoring Activities; Final Rule： Methods Innovation Rule and SW-846 Final Update IIIB, June 14, 2005.
- 13.USEPA, Innovative Technology Verification Report – Field Measurement Technology for Mercury in Soil and Sediment – NITON's XLi/XLt 700 Series X-Ray Fluorescence Analyzers (EPA/600/R-03/148), May 2004.
- 14.USEPA, Innovative Technology Verification Report–Field Measurement Technology for Mercury in Soil and Sediment–Metroex's X - MET 2000 X-Ray

- Fluorescence Technology (EPA/600/R-03/149), May 2004.
15. USEPA, Innovative Technology Verification Report – Field Measurement Technology for Mercury in Soil and Sediment – Milestone Inc.’s Direct Mercury Analyzer (DMA)-80 (EPA/600/R-04/012), May 2004.
 16. USEPA Superfund Innovative Technology Evaluation (SITE) website.
(<http://www.epa.gov/ORD/SITE/>)
 17. USEPA, Field Portable X-ray Fluorescence Spectrometry for the Determination of Elemental Concentrations in Soil and Sediment (Method 6200), January 1998.
 18. 環檢所，土壤和底泥中元素濃度快速篩選方法－攜帶式 X-射線螢光光譜儀分析法(NIEA S322.60C)，民國 95 年 1 月 18 日。
 19. NJDEP, Field Sampling Procedures Manual, October 2005.
 20. USEPA Environmental Repose Team, Photoionization Detector (PID) HNU, SOP#2114, October 6, 1994.
 21. 環保署，油品類儲槽系統土壤及地下水污染調查、驗證作業及整治工作等技術規範建置計畫－附冊三 油品類儲槽系統快速場址調查及評估技術參考手冊，民國 95 年 5 月。
 22. 吳曉芬、劉文堯、陳冠宏，X 射線螢光偵測器(FPXRF)於重金屬污染土壤現地篩選之應用，第一屆海峽兩岸土壤與地下水污染整治研討會，民國 91 年 9 月 4~5 日。
 23. 彰化縣環境保護局，彰化縣農地土壤重金屬含鉻銅鋅鎳(不含鎘)污染控制場址之污染改善計畫期末報告(初稿)，民國 93 年 7 月 20 日。
 24. 林文楨，某化工廠整治工作執行成果報告，九十二年度「土壤及地下水污染整治業務檢討會」會議資料，行政院環境保護署，民國 92 年 11 月 13~14 日。
 25. 環保署，地下水潛在污染場址調查與應變計畫，民國 91 年 12 月。
 26. 環保署，土壤及地下水污染事緊急應變案例探討－附冊四 我國土壤及地下水污染事件緊急應變案例探討，民國 93 年 4 月。
 27. 環保署，全國廢棄工廠土壤及地下水污染潛勢調查計畫，民國 94 年 11 月。

第五章 土壤及地下水污染整治技術

本章主要針對鋼鐵冶煉業可能造成環境污染物類型，包括重金屬、油品、戴奧辛等，蒐集國內外土壤及地下水整治技術相關資訊，供產業界參考，分別就各項技術介紹、適用性、技術限制、成本分析等內容進行介紹，最後並提供國內外相關整治案例。土壤重金屬整治技術包括固化/穩定化法、玻璃化法、土壤清洗與酸洗法、高溫分離法及現地土壤沖洗法，土壤油品污染整治之土壤氣體抽除法與生物通氣法，以及戴奧辛土壤污染整治技術等；地下水重金屬整治技術則包括污染地下水經現地抽除後，所採用之沉澱及共沉澱法、薄膜過濾法、吸附法、離子交換法，及透水性反應牆，地下水油品污染整治技術包括空氣注入法與現地地下水生物整治法；可同時處理土壤及地下水重金屬污染之電動力法與植生復育法，及同時處理土壤及地下水油品污染之生物漱洗法等。

5.1 土壤污染整治技術

5.1.1 固化/穩定化法^[1-4]

固化處理方式(solidification)指以包覆壓縮有害之污染物使污染物之毒性溶出及流動性降至最低，並將其匣限於固化體中，此過程亦稱匣限化(encapsulation)；穩定化處理(stabilization)是指利用化學劑與有害之污染物混合或反應，使污染物有害成分穩定或降低其危害性之處理方法。固化/穩定化法(solidification/stabilization, S/S)乃是經由減少污染物與外界接觸之表面積或降低有害之污染土壤、污泥或廢棄物滲透性及溶出性的處理方式，此技術已被廣泛應用並證實能夠有效地降低多種污染物之移動性，可處理之污染物質例如：重金屬、特定放射性廢料、部分有機污染物等物質。一般而言，固化/穩定化方式較適用於處理非揮發性之重金屬。普遍應用於固化/穩定化處理之藥劑或物質有：波特蘭水泥(Portland cement)、生石灰(quicklime)或石灰石(limestone)、飛灰(fly ash)、有機黏接劑(organic binders)(例如：柏油)、上述物質之混合物等物質。有害污染物與固化/穩定化藥劑之混合可應用於離地整治，即以批次或連續式操作之方式，或應用於現地整治污染土壤，以連續式注入操作方式進行。有害污染顆粒物質直接與添加藥劑進行包匣作用，稱為內匣限或微匣限(micro-encapsulation)；若有害污染物顆粒或已經微匣限處理之物質由整體外圍包裹密封之方式聚集污染物，則稱為外匣限或巨匣限(macro-encapsulation)。

固化/穩定化法利用化學藥劑與污染物結合可達到以下目的^[5]：

- 藉由形成固體物改變廢棄物之物理性質

- 降低污染物溶解度
- 降低廢棄物接觸表面積
- 藉低廢棄物透水性以減少與水體接觸的機會

一、固化/穩定化處理之基本原理^[3,4]

(一) 水相穩定化/固化(aqueous stabilization/solidification)

早期固化/穩定化處理技術是指水相中之穩定化及固化，因為化學反應只在水相中發生，然而普遍在文獻中只稱作穩定化及固化。此項技術漸漸的被區分為單獨穩定化處理及膠結穩定/固化合併處理(cementitious S/S)。穩定化程序中需加入化學藥劑使污染物產生強大的物化力量，將污染物轉變成較不具水溶性、不溶出、不具移動性及轉變成無毒性之結構體，因此，於固化/穩定化合併處理過程所添加之膠結黏接劑或固化劑通常也提供穩定化所需之藥劑。

1. 穩定化(stabilization)

(1) 金屬及無機污染物之穩定化

為達到金屬及無機污染物穩定化，其應用之方式有：ProFix™法及可溶性磷酸鹽安定法(soluble phosphates)。此 2 種方法概述如下：

- ProFix™ (EnvironGuard, Inc., Houston, Texas, USA)

即以稻穀灰(rice hull ash)為主要原料之商業化產品，其成分為非定型(amorphous)、生物性矽土(biogenetic silica)。稻穀灰具有吸附功能並可與鹼反應，當存在於鹼性環境下會產生溶解性矽酸鹽，其與有毒之金屬離子作用後形成低溶解度之金屬矽化物，可增加金屬之穩定性，避免有毒金屬之移動。

- 可溶性磷酸鹽安定法

此法是利用加入含有磷酸鹽之藥劑，使其與污染土壤中之重金屬形成金屬複合物，此磷酸鹽金屬複合物通常於一般 pH 環境中具有低溶解性，因此而降低重金屬之移動性，然而對某些特定金屬複合(例如鎘)則需高 pH 之環境，此時強鹼可一併加入以控制 pH，由於磷酸鹽複合金屬並不形成一固體物，而為膠體顆粒狀，因此磷酸鹽之使用可同時加入固化劑以加強處理後之固化物理性質。

(2) 降低有機污染物之移動性

早期針對於土壤或污泥中低濃度之有機污染物常添加活性碳配合安定/固化程序，降低其移動性，以達到 TCLP 溶出試驗之規定。然而，依據較新之 TCA (total constituent analysis)測試方法，此類添加物質(如活性碳)並不能有效降低污染物之移動性。因此，陸續有多項新穎之有機污染物穩定程序及藥劑被研發並應用，其中包含：

- 橡膠顆粒(rubber particulate)

商業化產品主要由磨細的橡膠材質顆粒特製而成，此材質對於處理半揮發和非揮發性有機物非常有效，例如：殺蟲劑、除草劑和多氯聯苯，此外，也可用於處理某些特定揮發性有機物及有機金屬化合物。經由 TCA 檢測方法測試發現：橡膠顆粒可有效應用於約 60 多種有害性有機物之穩定化。

- 有機黏土(organo-clays)

有機黏土是由 4 個鋁離子取代黏土礦物中的 I A 和 II A 族金屬離子，如此可增長層狀矽酸鹽和金屬離子之間的距離，使有機物能在矽酸鹽層之間被鉗合，提升黏土對有機物的親和力，以更強的力量和有機物分子結合。此方法至今仍不斷革新，許多國外代處理公司(例如：Silicate Technology Corporation (STC)，International Waste Technologies (IWT)、Hazcon 及 Soliditech 等公司)皆可提供完整的現場實際有機黏土處理技術。

2. 膠結穩定/固化處理(cementitious S/S)

膠結穩定/固化處理藉由無機固化劑的特性與廢棄物反應，形成一物化性質穩定的擬似礦物(pseudo-mineral)固體結構，使固體物之質地與土壤及岩石類似。

大部分商業化的膠結穩定/固化處理皆利用類似波特蘭水泥(Portland cement)予以固化之方式，波特蘭水泥是以石灰石和黏土或其他矽酸鹽混合物於高溫燃燒形成為水泥熟料(cement clinker)，而後將其研磨成粉狀製成；而以卜作蘭反應(Pozzolanic reaction)為基礎之固化方式則是添加如飛灰(fly ash)或水泥窯灰(kiln dusts)等物質，其中含有較多二氧化矽及氧化鋁，而些微有別於波特蘭水泥固化。而在這些化學反應中，水為不可缺少的角色，其可提供化學反應中水合反應所需之水量。以下列舉幾項傳統市面上常見的固化程序，星號部分為現今應用上較重要的方式：

- (1) 以波特蘭水泥為基礎(主要組成為水泥)*
- (2) 波特蘭水泥/石灰
- (3) 波特蘭水泥/黏土
- (4) 波特蘭水泥/飛灰*
- (5) 波特蘭水泥/可溶性矽酸鹽*
- (6) 石灰/飛灰*
- (7) 水泥或石灰、水泥窯灰*
- (8) 爐灰

以下列舉 3 項膠結固化程序之化學反應及使用方式：

- (1) ProFixTM：其反應原理已於上述 5.1.1 節、一、(一)中陳述。

主要可用於以下 2 種廢棄物處理程序：

- 當進行硬化之化學反應時，需要以物理吸附方式除去低固體含量廢棄物中多餘的水分。
- 廢棄物中微溶性的金屬化合物可能會隨時間而逐漸地溶解於水中，ProFixTM之存在會持續產生可溶性矽酸鹽，因此當金屬自廢棄物中溶出時，即便可反應生成金屬矽酸鹽物種，予以固化沉澱。

ProFixTM 因具有高吸附量、多孔性結構及巨大表面積，因此也能用於固定有機物。其中部分灰渣由於含有高達 5%的含碳量，因此其具有類似活性碳的吸附功能。

- (2) Chemfix

美國 Chemfix 公司之方法為將溶解性矽酸鹽類及矽酸鹽沉降劑(silicate setting agent)，如水泥、石灰、石膏等，在控制狀態下與廢棄物產生反應，而生成高穩定性易成粉末之結構。國內有固化廠有此技術之應用實例。

- (3) 水淬爐渣(cement-slag)

爐渣常合併使用於多種穩定化程序中，或和其他試劑共同使用。當煉鐵高爐中所產生之爐渣，於高溫時經噴水快速冷卻形成水淬爐渣，其中含矽、鈣、鋁等具有活性之玻璃質成分，經搗碎成細粉後可取代部分水泥作為混凝土的膠結材料，水淬爐渣可藉水泥水化後產生之氫氧化鈣進行波特蘭反應，生成具有膠結性之矽鈣膠體。另外，因為爐渣中含有亞鐵離子及還原態含硫化合物，使其可做為金屬的還原劑，某些在還原狀態較不具移動性的

金屬則可利用此一特性得以還原並達到穩定固化，例如：將六價鉻還原成三價鉻予以沉澱並降低毒性。然而經緩慢冷卻而形成結晶的熔爐灰渣(例如：常溫下自然冷卻的爐渣)則無法產生膠結凝固反應。

3. 現地穩定化及穩定/固化處理(in-situ stabilization and S/S)

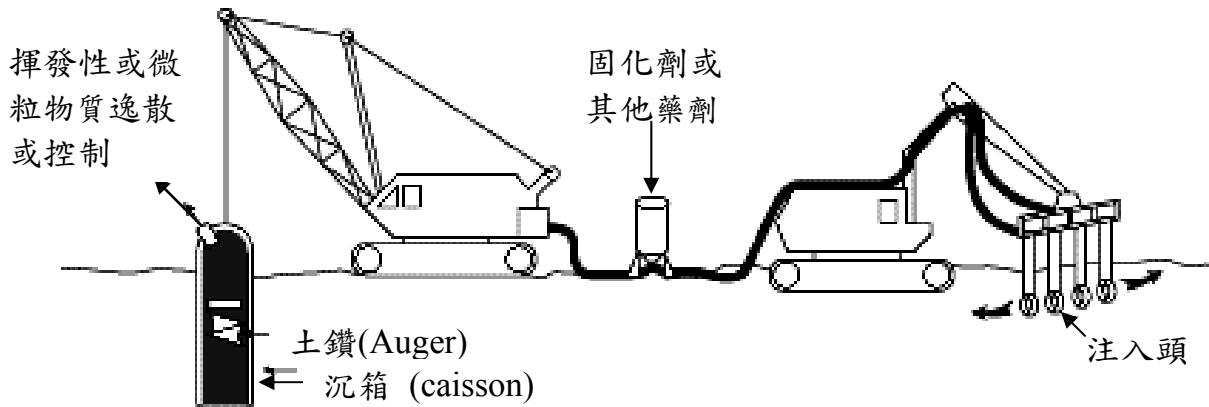
在現地穩定/固化的應用中，利用專門的機具開鑿、鑽孔，將穩定/固化試劑注入受污染土壤區域。現地和離地穩定/固化各有其優缺點，對於淺層污染地區或大型機具無法進入的場址，由於離地處理方式對於試劑的混合添加及品質有較好的控制，因此較具可行性；而對於深層的污染及大規模之整治範圍，現地處理則較為適用，可利用開鑿機具將固化試劑和受污染土壤直接混合，如此可降低整治所需的成本。

如圖 5-1 所示，經由一垂直、空心管柱，將稀泥狀之穩定/固化藥劑以螺旋槳葉打入受污染土壤。圖所示土鑽設備可產生高達 41,500 kg-m 的扭力，能有效的將污染土壤和藥劑均勻混合，使其獲得良好處理，處理深度通常可達 30 公尺，而影響範圍直徑可達 4.3 公尺。後續再將圓筒狀處理範圍移動至其他區域，以涵蓋所有污染範圍區域，則即可有效處理整個污染場址。當使用斗篷狀集氣罩覆蓋於開挖土壤鑽孔機具上方，則可有效控制或收集現地穩定/固化處理時，管柱處理區域所產生的揮發性或微粒物質。

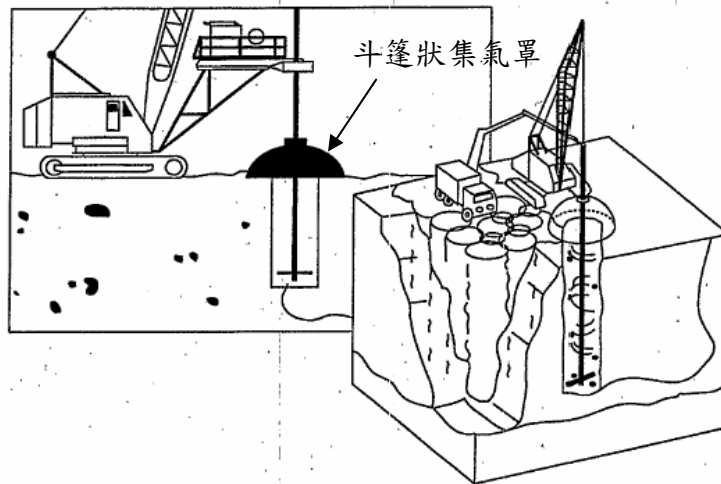
對於離地處理方式，前處理及固定化通常必須分成兩步驟來進行，然而，對於現地處理方式而言，則可兩步驟同時進行，例如：應用於金屬固化程序之前處理時，可藉由注入氧化劑以移除有機污染物，降低其含量，如此可減少處理成本。

土鑽形式的現地穩定/固化處理系統在以下兩種情況非常適用：

- (1) 在必須同時控制揮發性有機物及臭氣逸散的污染場址。
- (2) 當污染源位於深度超過 7.6 公尺之深層土壤，或傳統挖掘機具使用受到限制時。土鑽形式的處理方式對於垂直和水平的處理位置皆能有效地掌控。



(a) 現地穩定化及穩定/固化處理示意圖^[6]



(b) 使用斗篷狀護罩之現地穩定化及穩定/固化示意圖^[3]

圖 5-1 現地穩定化及穩定/固化處理技術

(二) 聚合物穩定/固定化(polymer stabilization/solidification)

聚合物穩定/固定化能以液態聚合物在相對較低之溫度下，將廢棄物包覆或與其結合，經過冷卻、凝固之後，形成固體狀產物。雖然聚合物主要用於固化程序，然而聚合物與其他穩定劑混合後之應用，仍可歸納為穩定/固定化技術。聚合物穩定/固定化不論在離地或現地皆可進行。

聚合物依其使用目的可分為 2 種：

1. 熱塑性固化劑(thermoplastic binder)

熱塑性固化劑具有直鏈狀分子結構，經加熱後形成熔融狀態之流體，而冷卻後會固化硬化。聚乙烯(polyethylene)、硫化聚合物(sulfur polymer)、瀝青(bitumen)皆屬熱塑性固化劑。當熱塑性固化技術用於微匣限時，須將熔融之固化劑與廢棄物混合，使較小之廢棄物顆粒散佈於熔融之聚合物中，經冷卻形成堅硬的固體。若應用於巨匣限時，則需將廢棄物置於承裝廢棄物之容器中，再將熔融之熱塑性固化劑倒入，待聚合物冷卻後，即可形成一層聚合物固體物包覆於廢棄物質外圍。

2. 熱固性固化劑(thermosetting binder)

熱固性固化劑為多種液態物質成分的結合，例如：聚合物單體(monomer)、催化劑(catalyst)、促進劑(promoter)，始能進行聚合反應，並硬化形成固體。熱固性固化劑無法具有可流動狀態，於固化硬化過程中，該物質原有的特性將會改變。常用於廢棄物固化處理的熱固性固化樹脂有乙烯酯苯乙烯(vinyl ester-styrene)、聚酯苯乙烯(polyester-styrene)及環氧樹脂(epoxy)，不僅可應用於微匣限或巨匣限中，也能夠用於現地穩定/固定化處理。此項熱固性固化聚合程序於商業化的應用已超過 20 年以上，故在此只針對例如現地穩定/固定化等較新穎的應用作介紹。

(1) 聚乙烯(polyethylene)

聚乙烯是一種結晶過程緩慢、熔融溫度相對較低的熱塑性物質，由乙烯氣體聚合生成，可藉由改變結構產生不同性質的產物。例如高密度聚乙烯(high-density polyethylene，下稱 HDPE)是由較少分支的長鏈聚合物組成，如此可使聚合物各層之間緊密結合。典型的 HDPE 密度介於 $0.94\sim 0.96\text{ g/cm}^3$ 之間。而低密度聚乙烯(low-density polyethylene，下稱 LDPE)則由高度分支的長鏈聚合而成，每 1,000 個碳原子當中約有 10~20 個支鏈，如此可使各層各自分散，形成較鬆散的結構。典型 LDPE 密度介於 $0.91\sim 0.93\text{ g/cm}^3$ 之間，相較於高密度聚乙烯，低密度聚乙烯具有較低的熔點 (LDPE 熔點： 120°C ，HDPE 熔點： 180°C) 和較低的熔融後之黏滯度，因此 LDPE 較容易應用於廢棄物的匣限作用處理。聚乙烯可抵抗多種化學物質和溶劑、冷熱溫度變化、微生物分解。

(2) 硫聚合水泥(sulfur polymer cement, SPC)

硫聚合水泥，又稱硫聚合物(sulfur polymer)，由美國 Bureau of Mines 公司(USBM)為處理石油提煉過程所產生的硫化物及含二氧化硫(SO₂)排放氣體處理後之產物，所研發之專利產品，其商業名稱為 Cement 2000，此產品即將 5%(重量比)的二環戊二烯(dicyclopentadiene)與硫元素結合製造而成，二環戊二烯主要是用以抑制固相間之不穩定性。硫聚合水泥為一熱塑性材質，而非水硬化水泥，具有相對較低之熔點，120°C，和較低之熔融黏滯度，25 厘泊(cP)，因此容易在加熱攪拌混合器中操作。相較於水硬化之波特蘭水泥，硫聚合水泥有幾項優點，例如：其壓縮力及張力為波特蘭水泥的 2 倍，且可在數小時內達到最大的結合強度，不需數週的反應時間。添加硫聚合水泥所製成的混凝土可抵抗大部分的酸性和鹽類物質的侵蝕，一般所知會破壞水硬性水泥結構的硫酸鹽，其對硫聚合水泥產物的影響相當小，甚至無任何影響。經測試暴露於 10⁸ 里達(rad)之 γ 射線照射後的硫聚合水泥，在結構體物理特性上並無明顯改變。

(3) 熱固性聚合物(thermosetting polymers)

熱固性聚合物是由未飽和的單體(例如：methacrylates)經過一連串的聚合反應所生成。聚合反應的起始作用階段通常是經由化學催化劑或由促進劑來推動反應進行。連接 2 個氧原子之間的化學鍵一旦斷裂，將會產生含有不成對電子、高活性的自由基，自由基打斷單體中的雙鍵，而開始進行鍵結，此階段即為單體持續加入主鍵的反應，當單體耗盡或長鏈兩端相結合時，反應即停止。溫度、催化劑與促進劑的結合及其濃度，及其他添加物的存在(例如廢棄物)皆會影響反應速率。凝膠時間(gel time)為樹脂黏滯度快速增加直到無法流動時所需的時間，會因製造廠商或催化劑、促進劑種類不同而有差異。

熱固性聚合樹脂在許多離地與現地之應用皆證實具有極高的耐久性，因黏滯性低(3~300 cp)，使其應用於現地時容易注入土壤層中；而當樹脂和廢棄物粒料結合成聚合水泥時，將可產生極佳的抗壓強度(可承受 48.3 MPa 以上的壓力，但須視其土壤粒料型態而定)。在污染場址經現地處理所形成的聚合水泥能有效抵抗具破壞性物質(例如酸或鹼)、溫度及濕度之變化、微生物降

解，及 10^8 rad 之輻射，並且具有小於 2×10^{-11} cm/sec 的水力傳導係數及低溶出性。熱固性聚合物之使用與熱塑性聚合物不同的是，當熱固性聚合物一旦聚合，便無法予以改變。

聚合物穩定/固化程序主要的優點之一為能夠廣泛應用於不同類型的廢棄物。任何穩定/固化的應用及選擇必需考量許多因素，例如：廢棄物特性、廢棄物體積、處理及後續處置成本，及法規管制要求等。對於聚合物匣限技術，某些特定因素會影響聚合物種類之選擇(例如：有機或無機，熱塑性或熱固性)，及處理方式的選擇(例如：微匣限或巨匣限，現地或離地)，其中更包含廢棄物本身之物化特性、處理後產物之最終處置、處置場址貯存廢棄物之標準、最終產物的穩定性、資金和操作成本、原料來源、處理程序難易度及可靠性。

二、限制因素

有關離地固化/穩定化法使用的缺點或限制，分述如下^[7,8]：

- (一) 環境的條件會影響長期固定之污染物質。
- (二) 固化/穩定化的過程會增加最終產物的體積。
- (三) 有些污染物質在固化/穩定化的過程中會呈現不穩定的狀態，故使用此法時必須加以選擇。
- (四) 時間的長短對固化/穩定化產物的影響是無法證明的，所以必須對固化/穩定化的產物加以長時間的觀測。

影響此法的適用性包括：土壤的特性、土壤顆粒的大小、含水量、重金屬的濃度、硫酸鹽的含量、有機物的含量、密度、滲透性、自由壓縮力等，另外，相關於此法的成本與其他的整治技術比較之下屬於中等，其約每公噸 110 美元，其中包含了開挖的成本。

表 5-1 及表 5-2 分別介紹可能影響穩定化及固化作用常見之因素。

表 5-1 可能影響穩定化作用的因素^[4]

影響因素	可能的影響
揮發性有機物	反應產生之熱促使有機物質揮發，無法有效降低 VOC 之移動性；含有揮發性污染物的土壤或污泥加入穩定劑前，須以熱處理除去水分及揮發性物質。
使用酸性吸附劑處理金屬氫氧化物	使金屬溶出。
使用酸性吸附劑處理氰化物	釋出氰化氫。
使用酸性吸附劑處理含硫廢棄物	釋出硫化氫。
使用鹼性吸附劑處理含有銨鹽之廢棄物	釋出氨氣。
使用鹼性吸附劑(含有方解石(calcite)或石灰石(dolomite)等碳酸鹽)處理酸性廢棄物	可能產生具發火性(pyrophoric)之廢棄物。
使用含矽之吸附劑(例如土壤及飛灰)處理含氫氟酸之廢棄物	可能產生溶解性氟矽酸鹽類物質(fluorisilicate)。
酸性溶液中存在會產生可溶性鈣鹽(例如：氯化鈣、醋酸鈣，或碳酸氫鈣)的陰離子	陽離子交換反應：由固化/穩定化產物中溶出鈣、增加水泥滲透性、增加交換反應速率。
鹵化物之存在	易從水泥或石灰中溶出。

表 5-2 可能影響固化作用的因素^[4]

影響因素	可能的影響
有機化合物	有機物可能會干擾廢棄物和無機固化劑的結合。
半揮發性有機物或多環芳香族碳氫化合物	有機物可能會干擾廢棄物的結合。
油脂	油脂會包覆顆粒，降低廢棄物和接著劑顆粒的結合。
細質微粒	由於細質微粒(通過#200 篩網的不可溶顆粒)會包覆較大顆粒物質，降低廢棄物顆粒和固化劑或其他試劑的結合。
鹵素	阻礙固化物質形成，容易由水泥或波特蘭水泥固化物質中釋出，或使熱塑性固化物質脫水。
錳、錫、鋅、銅、鉛之可溶性鹽類	對各金屬鹽類之存在，其各所需硬化時程的差異性，將可導致最終結構體之穩定性或降低產物的物理結合力量，增加金屬滲出的風險。
氰化物	氰化物干擾廢棄物的結合。
砷酸鈉、硼酸鹽、磷酸鹽、碘酸鹽、硫化物及碳水化合物	減緩固化或硬化時程，減弱最終固化產物的強度。
硫酸鹽	減緩硬化時程，並導致水泥穩定/固定化之產物膨脹或碎裂。於熱塑性的固化程序中，造成脫水及再水化(rehydrate)，而使結構物破裂。
酚	高酚含量會導致壓縮力明顯減弱。
煤或褐煤	煤和褐煤會影響固化程序及最終產物的強度。
硼酸鈉、硫酸鈣、重鉻酸鉀及碳水化合物	矽酸鈣和鋁酸水合物的形成會阻礙波特蘭水泥固化反應。
非極性有機物(油脂、芳香族碳氫化合物、多氯聯苯)	影響水泥、波特蘭水泥，或有機聚合物的硬化，降低結構物長期的耐久性。對於熱塑性固化物質，高溫將使有機物揮發。
極性有機物(醇、酚、有機酸、乙二醇)	高濃度的酚會減弱硬化程度，降低水泥、波特蘭固化物質的短期及長期耐久性。熱塑性固定/穩定化將會造成有機物揮發，而乙醇會減弱波特蘭水泥固化物之硬化。
固體有機物(塑膠、瀝青、樹脂)	對尿素甲醛聚合物之形成效果不佳，或許也會對其他聚合物之硬化程度有影響。
氧化劑(次氯酸鈉、過錳酸鉀、硝酸，或重鉻酸鉀)	對於熱塑性及有機聚合固化物存在可能會破壞結構體，或導致起火燃燒。

表 5-2 可能影響固化作用的因素(續)^[4]

影響因素	可能的影響
金屬(鉛、鉻、鎘、砷、汞)	如果金屬濃度過高，將延長硬化所需時間。
硝酸鹽、氰化物	將延長硬化時間，降低以水泥為基礎之穩定化產物的耐久性。
鎂、錫、鋅、銅、鉛之可溶性鹽類	使無機物質之最終固化產物膨脹或破裂，使結構體曝露更多表面積，增加金屬溶出可能性。
降低整體 pH 值之環境及廢棄物特性	導致最終結構物退化。
凝結劑(例：氯化鐵)	影響水泥及波特蘭水泥固化物之硬化。
土壤中超過 0.01% 或水中超過 150 mg/L 之可溶性硫酸鹽	硫將破壞水泥固化產物。
土壤中超過 0.5% 或水中超過 2,000 mg/L 之可溶性硫酸鹽	硫將嚴重地破壞水泥固化產物。
脂肪族及芳香族碳氫化合物	延長水泥所需硬化時間。
含氯有機物	如果濃度過高，將延長水泥硬化時間，並降低耐久性。
金屬之鹽類及複合物	延長水泥或黏土/水泥的硬化時間，並降低耐久性。
無機酸	降低水泥(第一類波特蘭水泥)或黏土/水泥的耐久性。
無機鹼	降低黏土/水泥的耐久性。氫氧化鉀和氫氧化鈉會降低第三類和第四類特蘭水泥的耐久性。

三、小結

針對固化/穩定化技術應用於一特定污染土壤之處理，必須經由初步之可行性試驗(treatability test)方可得知此整治方式之預期處理成效及其實際應用之可行性，因此，處理方式及程序之取決依各污染場址之特有地質土壤特性而定。由於固化/穩定化處理屬於中短期之中間整治技術，對於此技術長期(大於 5 年)之整治成效便難以於整治前評估認定，因此，

對於整治後長時間之土壤特性及穩定/固定化處理後污染物性質之變化，須進行長期監測以確定是否仍舊符合原先所設定之整治標準。

在考量固化/穩定化技術之選用、設計、處理成效及其處理之最終產物時，所需考慮之因子包含污染物之物化特性、處理程序所需之設施、最終產物之管理、相關法規規定、經濟效益等。與污染場址相關之考量因子包括場址位置、天候狀況、水文資訊等。針對可行性試驗，必須進行之分析測試包含有機/無機物分析、滲出性試驗、滲透度、單軸抗壓強度試驗、最終產物及滲出液毒性滲出試驗、凍融及乾/溼風化循環試驗(freeze/thaw and wet/dry weathering cycle tests)等。表 5-3 概述固化/穩定化技術應用於各類別污染物污染之土壤及污泥之處理有效程度。圖 5-2 及圖 5-3 則分別為離地及現地穩定/固定化處理方式之流程圖。

表 5-3 固化/穩定化處理一般類別污染物污染土壤及污泥之有效程度^[4]

	污染物群組	有效程度 (土壤及污泥)	註解： ■：適用 ▼：可能適用 □：不適用
有機物質	鹵化揮發性物質 非鹵化揮發性物質 鹵化半揮發性物質 非鹵化半揮發性物質 多氯聯苯 農藥 戴奧辛/呋喃 有機氰化物 有機腐蝕物質	□ □ ■ ■ ▼ ▼ ▼ ▼ ▼	
無機物質	揮發性金屬 非揮發性金屬 石棉 放射性廢料 無機氰化物 無機腐蝕物質	■ ■ ■ ■ ■ ■	
反應性物質	氧化劑 還原劑	■ ■	

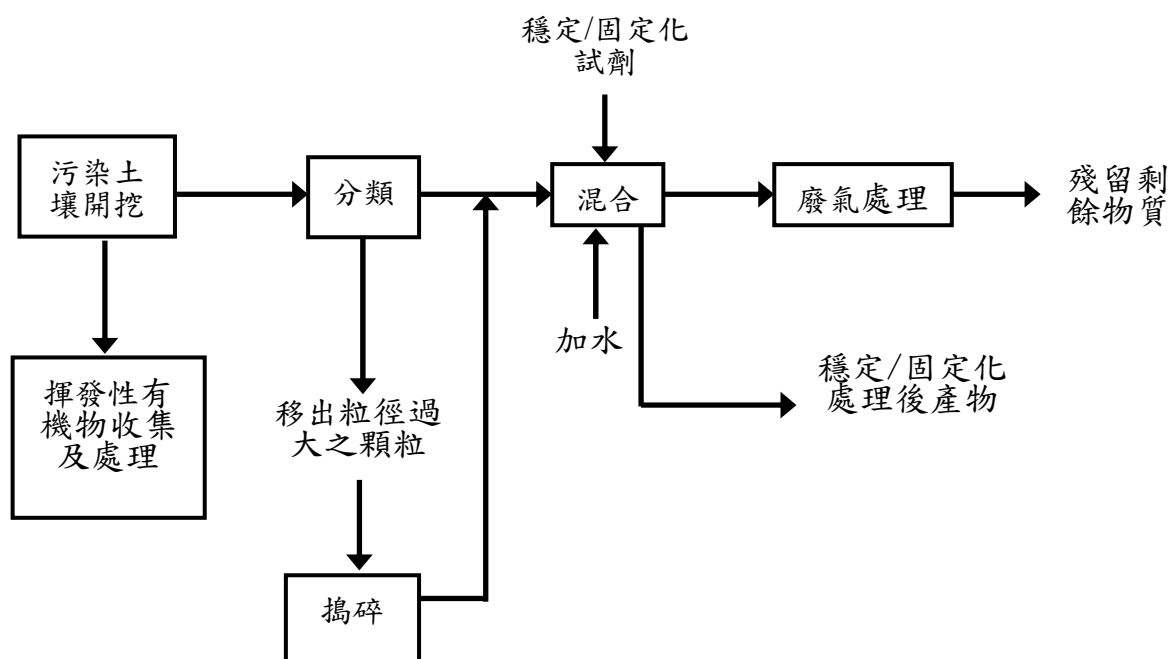


圖 5-2 離地穩定/固定化處理流程示意圖^[4]

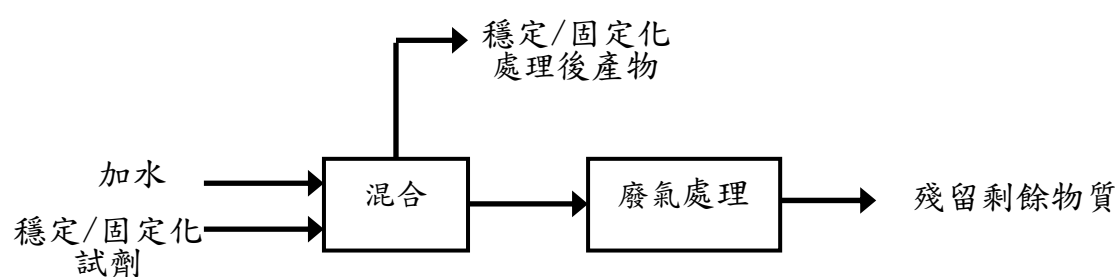


圖 5-3 現地穩定/固定化處理流程示意圖^[4]

5.1.2 玻璃化法

一、技術介紹

玻璃化法(vitrification)為將廢棄物於高溫下處理之技術(高於1,000℃)，使有機污染物和可燃性物質經由熱分解或燃燒程序以達到穩定/固定化的目的。玻璃化法與其他固化方式的不同之處在於所需熱能之

供給方式的不同。主要應用於玻璃化法的加熱方式包括電漿加熱(plasma heating)、電熱加熱(electric heating)、化石燃料燃燒(fossil fuel combustion)、感應加熱(induction)和微波加熱(microwave heating)等方式。

現地和離地(離地處理：高溫熔爐燃燒處理方式)之電熱玻璃化處理方法具有相同的基礎理論，皆以電力產生足夠的熱能以熔融含有矽成分的廢棄物質(silica-based)，而經高溫緩慢冷卻後形成含有非揮發性及不可燃物種之玻璃質物質。在現地玻璃化(in-situ vitrification)應用上，揮發性和可燃性有機污染物將被加熱而揮發，在確認污染土壤中所含之污染物種類後，通常可將石墨電極置入土壤形成一正方形之電能加熱區域。處理深度取決於電極的長度及可供應的電力。土壤在置入電極並通電之後，逐漸被電力所轉換之熱能升溫並熔融，一般土壤可被加熱到1,600~1,800°C。停止供電之後，受熱土壤逐漸冷卻而呈現玻璃化狀態。現行玻璃化技術可產生重達 1,400 公噸的土壤玻璃結塊，而處理深度可達 20 英尺^[9]。在玻璃化過程中，當有機污染物被熱解而轉換為氣相時，則須經由廢氣處理設備的收集、移除或分解有害氣體，使排放氣體符合排放標準。

現地玻璃化法必須破壞污染物或降低其移動性，因此其中受熔融物質必須含有足夠的鹽類(alkali content)(1.4~15%)以保持電導度和熔融溫度間的平衡。太多的鹽類(> 15%)會提高電導度使電熱設備產生的電流無法達到足夠的熱度；而鹽類過少將使導電度不足，並導致較高的熔融溫度。大多數的天然土壤皆含有足夠的鹽類以做為現地玻璃化處理之所需含量；然而在某些特殊場址，若土壤中鹽度不足，可藉由注入含鹽類之水溶液，或加入他種土壤及化學物質以彌補鹽類之缺乏。

玻璃化法為一項具吸引力的技術，因其可處理多種類型之廢棄物。除此之外，幾乎週期表中的每種元素或多或少皆能溶解於玻璃中，表 5-4 顯示元素在以矽質為主要成分之玻璃狀物質中的相對溶解度。只要選擇適當的玻璃化系統(例如分別以矽、鋁、磷或鉛為主要成分)，將可增加廢棄物處理之負荷量，並可因此減少最終產物的體積。

表 5-4 元素在矽酸玻璃中之大約溶解度^[3]

溶解度	金屬
少於 0.1 %(重量比)	銀、氫、金、溴、氫、氦、汞、碘、氫、 氮、氖、鉍、鉑、銻、氫、鈦、氫
介於 1~3 %之間(重量比)	砷、碳、氯、鉻、硫、銻、硒、錫、鎢、 鎢
介於 3~5 %之間(重量比)	溴、鈷、銅、錳、鉬、鎳、鈦
介於 5~15 %之間(重量比)	鈾、氟、釷、釷、鈷、鎳、鈦、硼、鎢
介於 15~25 %之間(重量比)	鋁、硼、銀、鈣、鉍、鐵、鈣、鉀、鋰、 鎂、鈉、鎢、鈷、鋁、鈷、鋅
超過 25 %(重量比)	矽、磷、鉛

一般而言，對於液態有機廢棄物，以傳統焚化程序處理的效能比使用玻璃化處理較佳。表列之金屬中，唯有汞無法以任何玻璃化技術處理，因其具有較低的蒸發溫度，在處理過程中，將會完全地被蒸發，並須經由廢氣處理設備予以收集、移除；而含其他表列之金屬的廢棄物則均可以玻璃化技術處理。

二、適用性分析

現地與離地玻璃化相較之下，現地處理方式有下列幾項優點：

- (一) 現地玻璃化可於較高溫度下進行，相較於一般熔爐的操作溫度，1,100~1,400 °C，現地玻璃化溫度可達 1,600~2,000 °C。於熔爐加溫程序中，為避免縮短離地熔爐耐火內襯之壽命，化學藥劑必須在處理中途加入於廢棄物中，使熔爐中的溫度降低。除此之外，每隔一段時間便必須關掉熔爐以更新熔爐耐火內襯，現地玻璃化因不需使用耐火內襯而無此項限制，且處理程序中不需要添加任何藥劑而能節省處理成本。
- (二) 相較於離地處理，現地玻璃化可於較高溫度下進行，因此可產生穩定度較高的玻璃化產物，而減少化學物質溶出性並降低玻璃的風化速率。
- (三) 現地玻璃化能使最終產物有較高的體積減少量，因為過程中無需添加任何額外物質或藥劑。
- (四) 現地玻璃化無須經過前處理即可處理大多數污染物質，也不須為了熔爐進料的尺寸限制，而改變廢棄物之體積。

(五) 現地玻璃化可應用於深層之污染土壤(20 英尺以上)。

(六) 現地玻璃化最終產物為一大型玻璃結塊廢棄物，比起熔爐的處理產物，通常有較小的比表面積，因此可降低風化程度和化學物質溶出性。現地玻璃化可減少公共和環境之安全風險，因處理後之產物可留置於原地，無需進行移除，而熔爐之處理方式對於處理後之產物則需較嚴格的管理，並進行污染物移除清運。

5.1.3 土壤清洗與酸洗法

一、土壤清洗法

(一) 技術介紹

土壤清洗法(soil washing)係將土壤挖除後，利用以水溶液為主的系統，將附著在土壤顆粒上之污染物與土壤分開，沖洗的過程中會將較細的泥土、泥沙粒子與較粗的沙子及砂礫土壤粒子分開，且將污染物集中於較小體積的土壤以便能更進一步處理及處置，所以重力分離對於去除高比重的重金屬(如鉛)顆粒而言是有效的。

土壤清洗法已廣泛地應用於歐美，美國最早於 1993 年紐澤西州之 King of Prussia 場址實際應用本技術進行污染場址整治，依據美國環保署之資料顯示^[10]，至 2002 年止，美國有 8 個超級基金(Superfund)場址曾經運用此一技術，且多採移動式設施，在歐洲則有移動式及固定式 2 種土壤清洗設施；在美國，土壤清洗技術係移除或洗滌土壤中大部分污染物，以減少必須進一步處理污染土壤的量，通常土壤清洗技術必須配合其他處理技術，方能達到土壤污染整治目標。荷蘭 Heidemij 公司最早於 1983 年利用本技術進行土壤污染整治工作，在歐美國家，經土壤清洗技術處理後之土壤回填至污染場址中，衍生之污泥及廢棄物則送至中間處理場或最終處置場處理。

(二) 影響因素

影響土壤清洗技術進行土壤污染整治所需之期程，主要與下列因素有關：

1. 坩土、黏土及污泥在污染土壤中之數量。
2. 土壤污染物之種類及數量。
3. 土壤洗淨設備之處理容量。

二、酸洗法

(一) 技術介紹

一般而言，受重金屬污染之土壤可採用酸洗法處理。酸洗法係以稀酸溶液(如稀鹽酸、檸檬酸、磷酸、醋酸等)作為受重金屬污染土壤之萃取劑，當酸性萃取劑淋洗受污染土壤時，使其與土壤中之重金屬發生作用，並將重金屬於酸液中溶出。酸洗法為一種使用酸性萃取劑來達到分離土壤中重金屬之化學處理技術。

(二) 方法步驟

酸洗法技術之處理流程，一般可分為前處理、萃取、淋洗分離、淋洗廢酸再生或處理、後處理等 5 個步驟，如圖 5-4 所示，各步驟說明如下：

1. 前處理

土壤經自然風乾後，先去除其中所含之植物殘體及篩除礫石。

2. 萃取

針對欲萃取之重金屬，選擇適當之酸液(如稀鹽酸、檸檬酸、醋酸、磷酸等)及調配成為適當濃度之酸性萃取劑。受污染土壤經與酸性萃取劑作用後，使土壤中之重金屬於酸液中溶出。

3. 淋洗分離

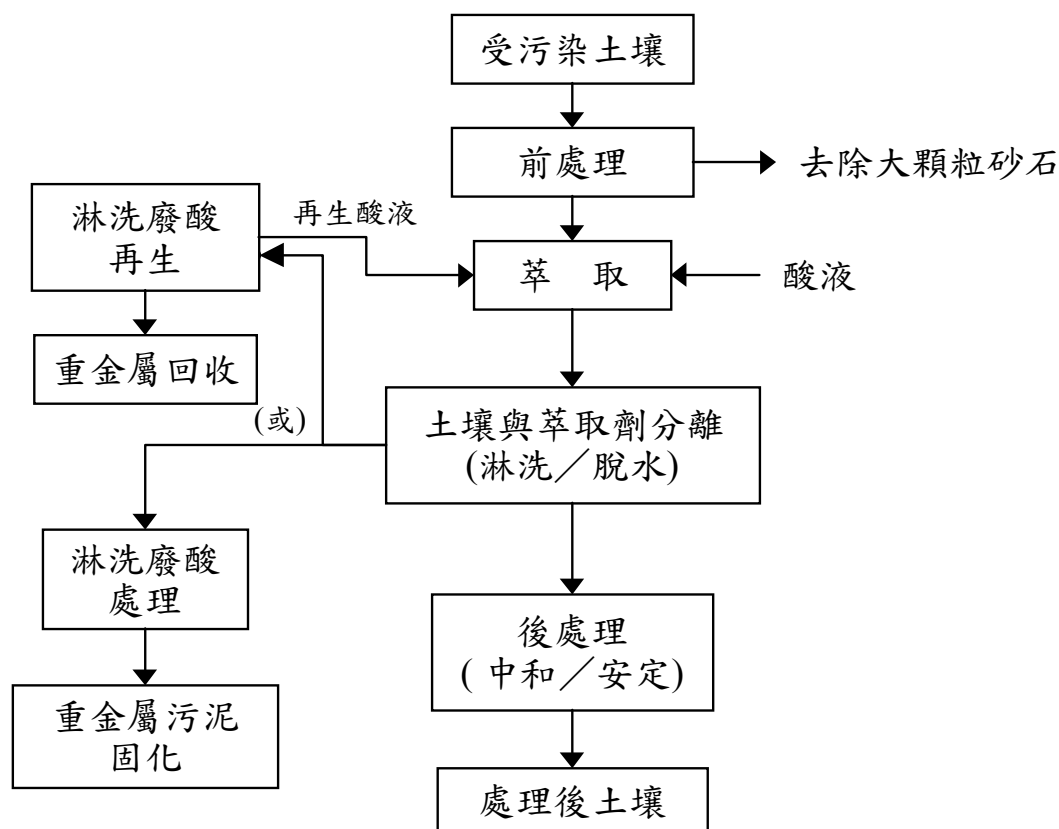
土壤與酸性萃取劑作用完成後，以水淋洗土壤，使土壤與萃取劑分離。

4. 淋洗廢酸再生或處理

土壤與酸性萃取劑作用完成後產生之淋洗廢酸，可經再生處理回收酸液供循環再生使用，並回收重金屬；或將淋洗廢酸逕予處理，不回收酸液及重金屬，其處理後產生之重金屬污泥，則予固化做最終處置。

5. 後處理

受重金屬污染之土壤經以酸淋洗處理後，需加入鹼劑(如碳酸鈣)以中和處理後土壤之酸性，使得進行後續回填處理。

圖 5-4 酸洗法流程示意圖^[10]

5.1.4 高溫分離法

一、技術介紹

高溫分離法(pyrometallurgical recovery)係利用溫度提升來達到重金屬萃取及再利用目的，而此高溫技術增加反應速率，因而降低最終產物體積^[10]。高溫分離法通常分為兩大程序，第一程序主要包括烘乾、蒸餾、熔鍊等三大步驟，此程序通常會產生重金屬熔渣，因而可以進行重金屬回收再利用；第二種程序主要是包括高溫萃取及固定化技術，此程序將使揮發性金屬與土壤分離而轉化到飛灰的部分，而在飛灰部分的重金屬將予以固定化而取代回收再利用，因此在此技術中，重金屬並無法回收再利用。

以高溫爐進行污染土壤處理，通常需要很有效的熱傳效應，以使得在排放廢氣中，減少粒狀污染物的排放。為達到此目的土壤顆粒的均勻化即變成影響高溫分離技術一個重要的因素。當處理土壤中含有大量的土塊及礫石將會降低土壤熱傳的效應，為求使顆粒均勻化，如進行顆粒粒徑分離或者將大顆粒的土壤變成小顆粒球狀的前處理步驟是必要的。小顆粒的土壤其實也不利於高溫分離程序之進行，因為將增加排放

粒狀污染物的含量。因此，進流的土壤介質有時需要進行球狀處理的設施，及達到顆粒均勻化的目的。因此，在進行高溫處理時，通常會加入還原劑，及提供足夠的空氣流量，以使得土壤的顆粒能與處理的藥劑及污染物質達到充分接觸的程序，以改善在反應器及氣體流況的情形^[10]。

由於汞的沸點只有 357°C 遠較於砷、鎘、鉛、鉻等 4 種重金屬來的低，而汞只要經過烘乾、蒸餾的程序，就可以得到高溫分離的效果。而對於上述其他 4 種重金屬，由於其沸點較高，因此要達到良好高溫分離技術的效果，通常要加入還原劑、助熔劑以增加熔化的效率，及得到良好熱能的來源。高溫爐的溫度通常低於待處理金屬的沸點，這是由於有助熔劑(如鈣的存在)，因此才可以在未達到沸點的情形下得以溶解，如鎘、鉛等揮發性金屬將會在尾氣加以收集；而如鉻及鎳等非揮發性金屬，則將以溶解性金屬的型態在高溫爐後加以收集。至於雜質部分，將以爐渣形式予以收集後再進行後續的處理^[10]。因此，高溫分離法排放物之型態通常可分為固體、液體及氣態 3 種形式。

二、處理場址需求

由於高溫分離設備係屬於非移動性設備，因此高溫分離法是離地(ex-situ)土壤整治技術，因此，污染場址與處理廠之距離，便成為決定處理成本的重要因素；由於處理設備之限制，其對於污染土壤的處理量必須有合理處理時間，因此處理廠的儲存容積及處理設施的需求需加以考量；另高溫處理法後續所排出的污染物，必須要有空氣污染防制設備加以處理。

三、適用性分析

- (一) 高溫分離法通常很少單獨使用，多與土壤清洗法一起使用，達到濃縮土壤中污染物的目的。
- (二) 適用高溫分離法污染土壤之濃度(如：鉛、鎘、鉻)，通常要高達 5-20%。
- (三) 適用於污染濃度低，但是容易得以還原或揮發之重金屬污染土壤之整治，如汞。
- (四) 適用於回收極具有經濟效益的金屬污染土壤，如黃金及白金。如文獻所示，回收 1 公噸的鎘的價錢是 5,950 元美金；1 公噸的鉻是 7,830 元美金；1 公噸的鉛是 700-780 元美金；1 公噸的砷 50-250 元美金；1 公噸的汞是約 5,295-8,490 元美金。

四、處理種類

至 1997 年止，在美國有 35 個工廠用高溫分離法處理重金屬污染土壤，其中 7 個處理廠回收汞，另外 16 個處理廠進行鉛的回收，至於其他處理廠是進行其他重金屬的回收。適合處理的廢棄物種類，包括：

- (一) 含鎘電池
- (二) 含汞廢棄物
- (三) 三酸電池
- (四) 含汞廢水及底泥的處理
- (五) 含鉛廢液
- (六) 含鋅廢液
- (七) 含汞廢液

5.1.5 現地土壤沖洗法

一、技術介紹

現地土壤沖洗法(in-situ soil flushing)是指使用化學藥劑注入到受污染的土壤或地下水，並在下游抽取出地下水沖洗液及污染物之混合物，然後在地面處理後再排放或再注入的一種方法^[11]。其方法的示意如圖 5-5。藉由沖洗液的注入，可改變地下水/土壤與污染物之吸脫附特性、氧化還原狀態、界面張力、酸鹼狀態及分配、溶解、沉澱狀態等，達到增加污染物溶解度，造成污染物與溶液形成乳液(emulsion)或產生化學反應，促使原吸附在土壤中或以不溶解型式(NAPL)存在之污染物易隨地下水移動，造成污染物之去除。

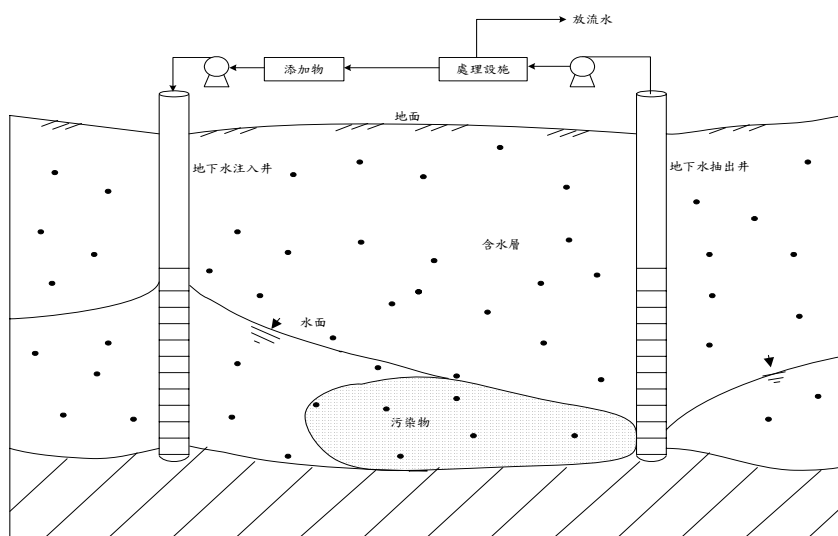


圖 5-5 現地沖洗法示意圖^[12]

對於重金屬之去除，常見的沖洗液包括界面活性劑酸及螯合劑。其中界面活性劑可同時用於有機物及重金屬之移除，其由親水基及疏水基兩部分所組成，當其濃度在水中超過臨界微胞濃度時，界面活性劑分子中的疏水部分會同時朝內，而使親水基朝外與水接觸形成微胞(micelle)結構。微胞型態增加疏水性有機物於水中溶解度或分配，並可與土壤競爭有機污染物，形成水溶液中的污染物整體濃度(apparent concentration)大幅增加；微胞表面若帶有負電荷，則可因靜電力相吸作用，將重金屬吸附於界面活性劑表面^[13,14]，而達到移除之目的。由於陽離子界面活性劑易與土壤表面吸附，因此通常用於土壤沖洗液的界面活性劑為非離子性或陰離子性^[15]。而酸及螯合劑的沖洗法主要是用於處理重金屬，在天然含水層 pH 值下，金屬容易吸附在土壤表面，藉由稀釋酸溶液的注入，改變地下水 pH 值將使重金屬脫附而變成較易移動。螯合劑的注入則可將土壤表面吸附的重金屬拉至移動相(水溶液中)。常用之酸溶液包括硫酸、鹽酸及硝酸，常用之螯合劑則包括 EDTA 及 DTPA^[15]。

二、技術適用性與優點^[15]

化學藥劑注入法適用於處理各類不同的污染物，配合不同工程注入技術，可適用的地質條件也頗廣。其優點敘述如下：

- (一) 無須開挖，建造成本比傳統之抽取處理法低。
- (二) 配合適當之注入技術，例如深層土混合法(deep soil mixing)與土壤破裂法(soil fracturing)，可以深入其他技術無法達到之區域。
- (三) 沖洗法對於吸附性以及低溶解性污染物尤其有效。

三、技術限制^[15]

- (一) 如何將沖洗藥劑注入與污染物接觸，是一大挑戰。受限於擴散效果，低滲透性地質影響半徑可能僅限於注入井附近。
- (二) 污染深度範圍大，或地質分層複雜，較難將化學藥劑注入到污染區域。
- (三) 反應後之產物毒性待進一步研究。
- (四) 沖洗法可能會造成污染擴散，本身造成之環境污染問題，以及土壤需氧量(SOD)使成本大幅增加問題均待克服。

四、小結

在現地沖洗法的部分，依對此項技術的現況評估報告^[12]顯示，至

1998 年 11 月止，全美國至少有 64 個場址使用經驗，其中 42 個為模場，22 個為實場，若單以實場而言，全美國已有 24 個執行中或完成的計劃。以沖洗液種類而言，實場中有 5 個使用界面活性劑，若包含示範場則有 35 個使用界面活性劑，24 個使用其他沖洗劑；主要目標污染物則以含氯碳氫化合物，DNAPL(重質非水相液相污染物)及 BTEX(苯、甲苯、乙苯及二甲苯)為最多，其餘如石油碳氫化合物、PAHs、PCBs 及重金屬場址亦均在 10 個以上。表 5-5 為典型現地沖洗法使用之相關參數及去除效果。由表中可看出，沖洗液體積使用介於 3-12 個孔隙體積(pore volume, PV)間，處理的污染物的效果則視污染物種類而定，但較大分子的污染物(如 PCBs 及 PAHs)仍有較難達到高去除效果的現象。

沖洗藥劑注入法的成本視反應物成本、整治目標、反應物再生可行性、污染物特性、注入方法及處理深度等因素而定。例如，利用 Fenton 法處理小體積的 NAPL(<1,816 公斤)，其單價為 220 美元/公斤，但處理更小體積的 NAPL 時(<454 公斤)，其單價高達 1,542 美元/公斤^[15]。若考慮現地沖洗法，文獻建議每一公斤土壤處理成本約為 75-210 美元之間，與其他現地方法，如現地固化穩定化、蒸氣注入及加強生物整治法的處理費用相當^[11]。

表 5-5 現地沖洗法建造特性資料^[15]

場址 (污染/測試面積)	污染物及濃度 (mg/L)	沖洗劑	注入量	注入方式	處理效果
Dupont Site,德州 (7.6×10.7 m)	CCl ₄ : 1,000 mg/L	界面活性劑	12 PV	地下水抽出、與介面活性劑混合、再注入	CCl ₄ : 214 mg/L
GE 場址，密西根州 (直徑 3 m,深 1.5 m)	PCBs : 6,000 mg/L 油 : 67,000 mg/L	界面活性劑	5.7PV + 2.3 PV	—	10 %去除 + 14 %去除
Quebec, 加拿大 (1,800 m ³ 土壤)	含氯碳氫化物 (200,000 mg/kg)	界面活性劑	—	—	回收 37.6 m ³ (50 天) 回收 160,000 kg (二期)
Quebec, 加拿大 (4.3×4.3 m)	DNAPL (55,000 mg/kg)	界面活性劑	水 : 1.34 PV Polymer : 0.9 PV 界面活性劑 : 0.9 PV 水 : 1.6 PV	—	回收 86 %
Traverse City 密西根州	TCE DCE BTEX	界面活性劑	2,044 L 溶液	單一 borehole 供注入與抽出	增加 40-90 倍 溶解度
木材處理， Laramie, 懷俄明州 空軍基地， 猶他州	重油 (93,000 mg/L) NAPL (佔 7%孔隙)	界面活性劑 鹼液 Polymer 共溶劑 70% 乙醇 12% 正戊醇 25% 水	— 10 PV	—	95 % 去除 主要污染物 : >90 %去除 DNAPL : >75 %去除
荷蘭 (6,000 m ² , 4-5m 深 1)	Cd : 5-20 mg/kg (共約 725 kg)	0.001M HCl	—	—	大多數樣品 < 2.5 mg/kg

5.1.6 土壤氣體抽除法

一、技術介紹

土壤氣體抽除法(soil vapor extraction, SVE)係針對未飽和層(通氣層)土壤中高揮發性污染物進行整治之方法。本技術利用真空抽氣，使存在於土壤中之污染物產生揮發作用，污染物由固相或液相轉移為氣相，並因抽氣井使污染區土壤產生負壓，使污染物隨土壤氣體往抽氣井方向移動，而被抽出，被抽除土壤氣體可進行回收或經處理後排放；本技術於操作時，常在地表上覆蓋一層不透水布，以避免產生短流現象，並增加影響半徑及處理效率。一般土壤氣體抽除系統如圖 5-6 所示，其優缺點彙整如表 5-6 所示。

二、應用

土壤氣體抽除系統最基本的配置是利用傳統的鑽井方式，設置 1 個或多個垂直井，如圖 5-7 所示，場址如未設置鋪面(如混凝土或瀝青鋪面)，一般井篩頂部設置在地面 1 公尺以下，以避免產生空氣短流的現象，抽氣井的運作可採連續式或間歇運作的方式。

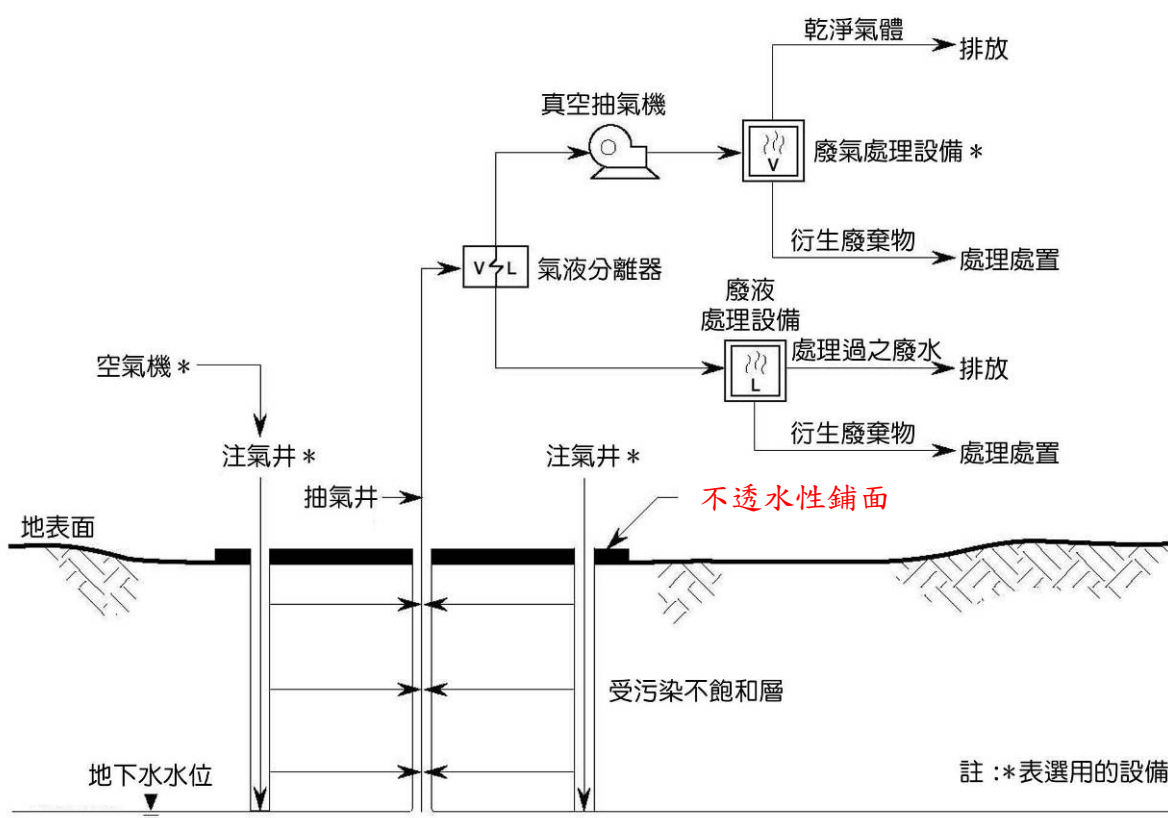
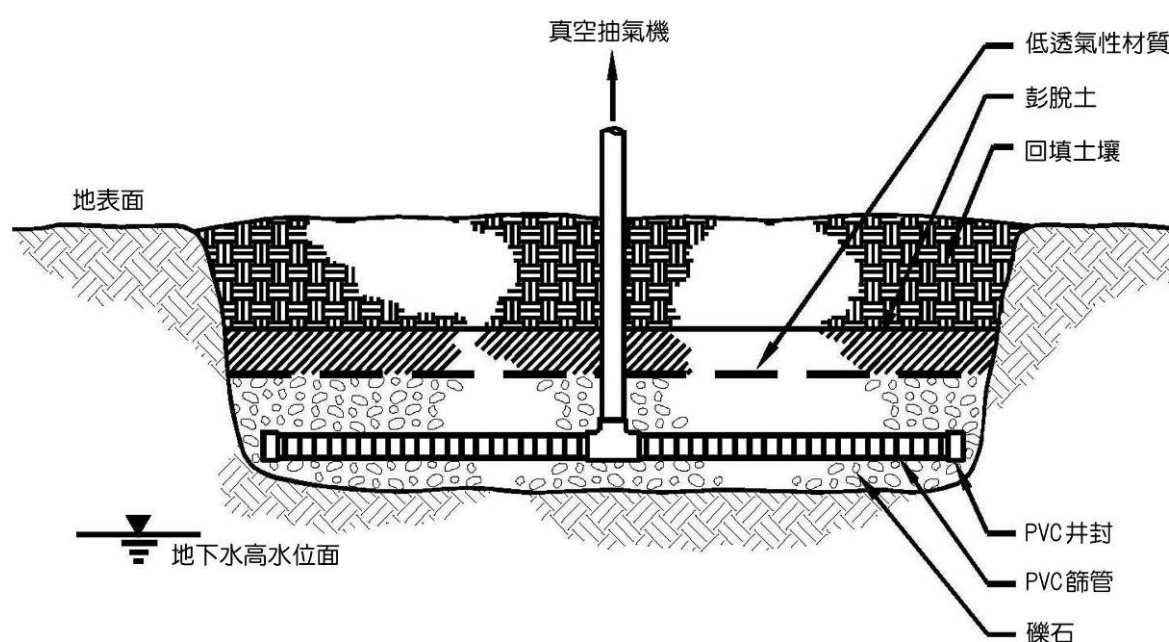


圖 5-6 土壤氣抽除系統示意圖^[16]

表 5-6 土壤氣體抽除法優缺點彙整表^[17]

優點	缺點
- 在國外，相關整治成效已被證明，使用者容易取得設備，設置安裝容易。 - 對場址運作之干擾最小。 - 整治期程短：在理想情況下，一般整治期程約 6 個月至 2 年。 - 整治價格具競爭性。 - 易與其他技術結合運用，如空氣注入法、生物整治法、生物漱洗法等。 - 可運用於建築物下方或其他不能進行開挖的地方。	- 污染物濃度降低 90% 以上不易達成。 - 當應用於低滲透性土壤或分層土壤之場址時，其處理效果之可靠性低。 - 經抽除後之土壤氣體，為符合空氣排放標準，其廢氣處理費用可能需支付較昂貴的處理費用。 - 僅適用未飽和層土壤污染整治；飽和層土壤及地下含水層部分需要採用別種整治方法。

圖 5-7 水平式土壤氣體抽除系統示意圖^[17]

三、處理成效

一般來說，土壤氣體抽除法已被成功地運用在處理位於中度透氣性及高透氣性含有揮發性污染物成分之土壤中，並被大量運用在含氯溶劑污染的場址中，至 2002 年，共有 213 個美國超級基金場址選用土壤氣體抽除法為其整治技術。

四、技術限制

土壤氣體抽除法不適用於低揮發性或低亨利定律常數之污染物，無法去除重金屬、重油、多氯聯苯或戴奧辛，但可能可以增進生物分解效率，亦不適合處理水分含量高或黏土質之土壤，更不適用於低透氣性的土壤環境中。雖可運用工程技術克服上述不利的條件，但會顯著增加整治經費。

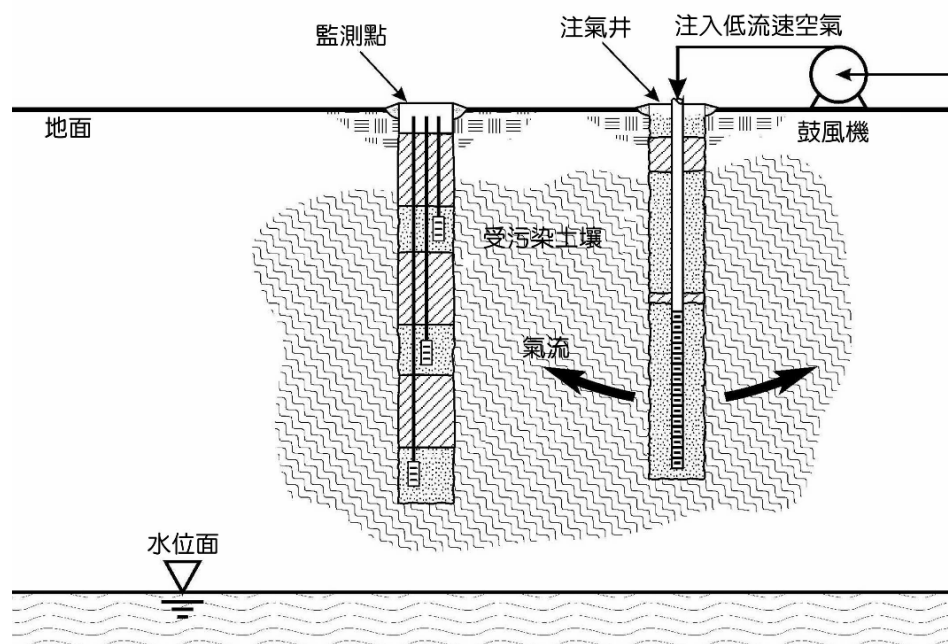
土壤對揮發性有機物之吸附力，會降低土壤氣體抽除系統對揮發性有機物之萃取率，亦即將揮發性有機物轉化為氣體之效率，土壤對污染物吸附力的影響，在整治階段後期最為明顯，土壤氣體抽除法將需要更長的操作時間，以處理最後殘留於土壤的揮發性有機物。

土壤的異質性亦將影響土壤氣體抽除系統的成效，氣體易在大粒徑土壤中流動，但不易在粒徑小的黏土中流動，且在一般情形下，揮發性有機物亦累積在黏土表面，因此，相對地流過高污染土壤的氣流量將極為有限。

5.1.7 生物通氣法

一、技術介紹

生物通氣法(bioventing, BV)係利用環境中原有微生物，對吸附於土壤、未飽和層或通氣層中之有機污染物進行生物降解的一種現地土壤污染整治技術。此技術在未飽和層中，利用注氣井或抽氣井產生空氣(或氧氣)的流動現象，或添加營養鹽的方式，增加原土壤微生物之代謝作用。當生物通氣系統採用抽氣井時，其操作程序與土壤氣體抽除法相似。土壤氣體抽除法儘量藉由揮發作用將污染物移除，生物通氣法則是將空氣流量降低，儘量避免污染物揮發至土壤氣體中，並藉由微生物的生物降解作用去除污染物。一般而言，土壤氣體抽除法與生物通氣法均存有不同程度之揮發及生物降解作用。一般生物通氣系統如圖 5-8 所示，其優缺點彙整如表 5-7 所示。

圖 5-8 生物通氣系統示意圖^[18]表 5-7 生物通氣法優缺點彙整表^[17]

優點	缺點
- 在國外，相關整治成效已被證明，使用者容易取得設備，設置安裝容易。 - 對場址運作之干擾最小，可運用於不易到達之區域(如建築物下方)。 - 整治期程短：在理想情況下，一般整治期程約 6 個月至 2 年。 - 整治價格具競爭性。 - 易與其他技術結合運用，如空氣注入法、地下水抽出處理法等。 - 可能不需昂貴之排放氣體處理設備。	- 若污染物初始濃度太高，則可能對微生物產生毒害。 - 某些場址狀況不適用，如土壤滲透性低、黏土含量高或未充分掌握地質狀況時。 - 不易達到極低濃度之污染整治目標。 - 若需注入營養鹽，則可能需考量是否適用相關水質標準。

二、應用

生物通氣法已被成功地運用在處理石油碳氫化合物、非含氯溶劑、農藥及其他有機化合物的整治工作上，亦經常使用於分子量大的石油碳氫化合物，如柴油或飛機燃料油的處理上，且大部分應用於表土下水位超過 3 公尺的場址中。利用共代謝式生物通氣法(cometabolic bioventing)則可處理在好氧狀態下不易降解之含氯有機物，如三氯乙烯、三氯乙烷與二氯乙烯等。

當污染場址地下水位較低或不易設置垂直井(如建築物下方)時，生物通氣系統亦可採用平行井的方式設置，如圖 5-7 所示。此外，利用抽氣井以及添加營養鹽之生物通氣法，如圖 5-9 所示。

生物整治法無法降解無機物，但可改變無機物之原子價狀態(價數)，使無機物易被吸附、攝取、累積及濃縮於微生物中，但該項應用尚處於研究階段。

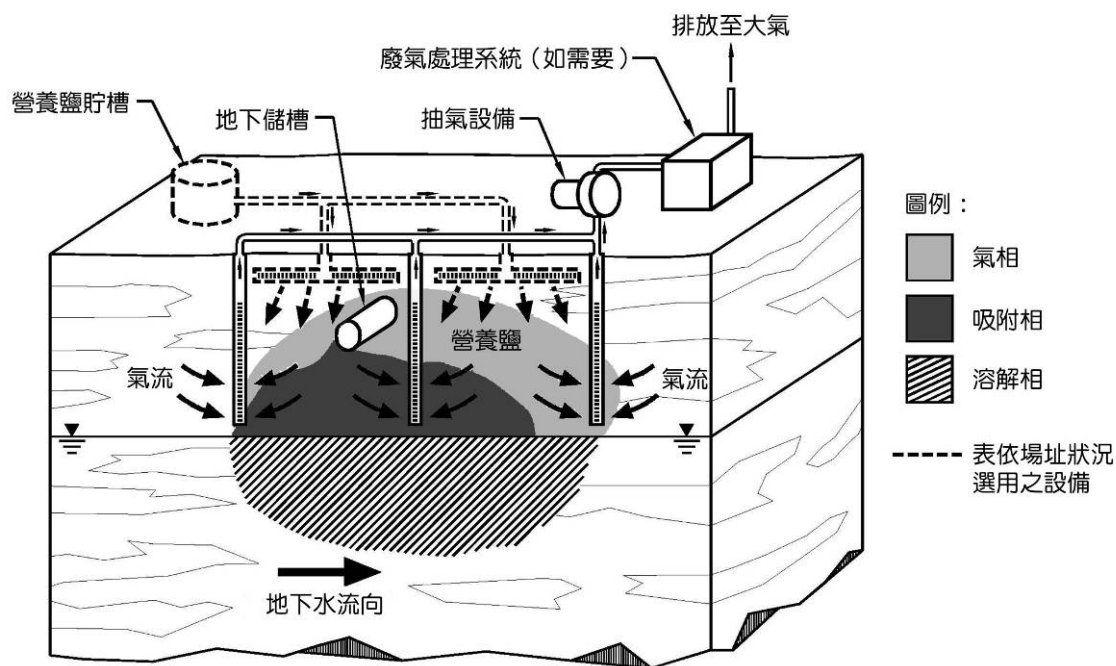


圖 5-9 利用抽氣井及添加營養鹽之生物通氣法^[17]

三、處理成效

生物通氣法已被成功地運用在處理石油碳氫化合物、非含氯溶劑、農藥及其他有機化合物的整治工作上。1992 年，美國空軍污染整治技術研究單位—AFCEE，於全美 145 個空軍基地中，進行油品污染場址之生

物通氣法處理可行性研究(treatability Study)，1996 年，AFCEE 將研究成果彙整於「Bioventing Performance and Cost Results From Multiple Air Force Test Sites」之技術驗證備忘錄中，該研究證實生物通氣法適用於多種不同土壤類型及氣候型態。

四、技術限制

污染場址應用生物通氣法之限制因素包括：

- (一) 在地面與地下水水位間小於 1 公尺、飽和土壤、低滲透性土壤之狀況下，會降低生物通氣法之處理成效。
- (二) 位於注氣井有效半徑內之地下室，室內可能積聚氣相污染物，其解決方式可在受影響的建築物附近設置抽氣井，以降低此一問題的影響。
- (三) 土壤水分過低時，可能限制生物通氣法之生物降解作用及其功能；土壤水分過高時，會造成注氣困難及通氣不均勻。
- (四) 可能需要監測土壤表面廢氣(off-gas)之排放狀況。
- (五) 好氧生物降解作用對於含氯化合物可能不具效能，除非有共代謝作用或厭氧循環(anaerobic cycle)狀況存在。
- (六) 在極寒冷的氣候條件下，雖已證實生物通氣法依然可以完成污染場址之整治，但低溫可能顯著降低生物降解速率。
- (七) 生物通氣法無法處理重金屬污染，並且可能對微生物產生毒害作用。

5.1.8 戴奧辛土壤污染整治技術

2004 年 6 月 18 日，芬蘭國家公共衛生研究院發行之一份有關底泥戴奧辛污染處理技術報告^[19]指出，傳統處理土壤戴奧辛污染之方法為高溫熱處理法，一般處理溫度須達 1,000°C，戴奧辛的破壞去除效率一般可達 99.9%或更高。當整治標準更低的情形下，一般會結合熱脫附法，將戴奧辛從土壤中揮發出來後，再利用處理溫度達 1,000°C 熱處理技術處理。

惟近年來，國內外環保團體對於焚化處理所產生戴奧辛副產物，有極大的疑慮，因此焚化處理法是否可有效破壞戴奧辛物質，時有爭論。有鑑於焚化處理技術可能產生戴奧辛與呋喃等副產物之疑慮，美國環保署於 2005 年 12 月，針對斯德歌爾摩公約之 12 種持久性有機污染物及其副產物(多氯聯苯、戴奧辛與呋喃等)污染土壤之非焚化處理技術，完成一份調查報告^[20]，其

中可處理戴奧辛污染土壤之整治技術包括氣相化學還原法(gas phase chemical reduction, GPCRTM)、GeoMeltTM、熱脫附、鹼性催化分解法與 CerOxTM 等方法，摘要說明如下。

一、旋轉窯(rotary kiln)

旋轉窯焚化爐主要包括微傾(傾斜度 5 度以下)可轉動的爐體、二次燃燒室及空氣污染防制設備。污染土壤或廢棄物則由較高的爐體一端進入，在爐內水平移動並通過爐體，處理後的土壤或廢棄物灰燼於較低的一端排出；二次燃燒室用以延長廢氣滯留時間，使污染物可被充分燃燒破壞，使戴奧辛物質被氧化為無害的氣體；空氣污染防制設備通常包括驟冷段(防止戴奧辛再產生)、填充式吸附塔、集塵器及其他處理設備。焚化效率與爐內氣體的擾動、溫度及滯留時間有關，旋轉窯對污染物的破壞去除率可達到 99.9999%或更嚴格的破壞去除率。

二、氣相化學還原法

氣相化學還原法的第一階段，係將污染土壤置於熱還原反應槽中，在缺氧的狀況下，加熱至 600℃，使有機污染物由土壤中脫附，變成氣態，處理後土壤於冷卻後，可回填或進行離場掩埋。本法處理的第二階段，係將含有污染物的氣體導入 GPCRTM 反應槽中，在 850~900℃ 之條件下，與氫氣進行反應，將污染物轉變成甲烷或水，當含氯有機污染物(如多氯聯苯、戴奧辛與呋喃等)存在時，並產生含鹽酸的酸性氣體，廢氣與酸性氣體以鹼性氣體洗滌塔冷卻、中和酸性氣體及移除粉塵。由於廢氣中含有高濃度的甲烷，氣體經收集後，予以貯存做為 GPCRTM 處理程序中利用高溫催化產生氫氣所需的燃料；洗滌廢水則利用粒狀活性碳處理設備處理後排放。

三、GeoMeltTM

GeoMeltTM 為玻璃化處理技術，係利用高溫破壞污染物，並將殘餘物質永久固結於玻璃化的最終產物中，其處理技術型式包括：離地處理技術(in container vitrification, ICVTM)及現地處理包括現地玻璃化(ISV)、地下平面玻璃化(subsurface planar vitrification, SPVTM)等 3 種，均採用電流加熱、玻璃化之技術，ISV 型式適用於土壤污染深度大於 3 公尺以上之污染場址，SPVTM 則適用於污染深度較淺的場址。GeoMeltTM 研發出可處理深層污染(地面下 10 公尺以上)之特定污染層之玻璃化處理技術 Deep-SPV。

現地玻璃化係將整列的電極垂直置入受污染之地下區域中，由於土壤不具有導電性，本技術於整治初期會於兩電極間，先插入石墨棒、玻璃熔塊(glass frit)，通電後，石墨棒、玻璃熔塊將會促使電流通過並加熱，以及熔融緊鄰石墨棒、玻璃熔塊旁之土壤，熔融土壤則具有導電性，熔融現象將向外並向下擴展，一般加熱溫度將維持在 1,400 至 2,000 °C 間。由於加熱過程中有機污染物可能會蒸發逸散出來，且高溫破壞與反應過程中所產生的二氧化碳、水，以及當含氯有機污染物(如多氯聯苯、戴奧辛與呋喃等)存在時，可能產生酸性氣體，應予以收集、處理後，方能排放。

四、熱脫附法

熱脫附法用於將附著於固體物質之有害性有機污染物揮發，脫附後的有機物需要利用其他系統再處理。熱脫附系統包括廢棄物先處理及進料單元，熱脫附室、排氣冷凝、分離及處理系統。熱脫附系統將污染物自土壤中分離出來，在熱脫附室加熱，將水分、有機物及部分金屬揮發，藉著氣流或真空系統將揮發後的水分及污染物送入廢氣處理系統，熱脫附法系統的設計旨在揮發污染物，而非氧化，因此，依熱脫附的操作溫度可分為兩類：高溫及低溫熱脫附。

- (一) 高溫熱脫附：將受污染土壤或廢棄物加熱至 320°C 至 560°C，依整治場址的狀況，可與焚化法或脫氯法配合使用。
- (二) 低溫熱脫附：將受污染土壤或廢棄物加熱至 90°C 至 320°C，若非將溫度調至低溫熱脫附的最高限度，土壤內的有機物質不會破壞，故可使處理後的土壤保持日後的生物活動。

五、鹼性催化分解法

鹼性催化分解法為化學脫氯技術之一種，化學脫氯技術係將含鹵素污染物，利用化學反應程序，將污染物中的氯原子取代，降解為較不具危害性或無危害性的物質，其處理程序一般為將添加劑加入受污染土壤或底泥中，再進一步將加熱至可以發生脫氯反應的溫度。化學反應所產生的氣體自反應槽排出後，經冷凝，並以活性碳進行處理。處理後的土壤經水洗，移除殘留的添加劑與脫水後，可回填於場址內。

鹼性催化分解法最著名的整治案例為澳洲雪梨 2000 年奧運場地附近之 Homebush Bay 之戴奧辛整治工作(處理程序如圖 5-10)，該技術的主要限制條件包括：需使用大量的添加劑，將大幅提高整體整治費用，使

原具處理成本優勢的技術，成為處理費昂貴的處理技術；如處理底泥時，設備需調整加熱條件。

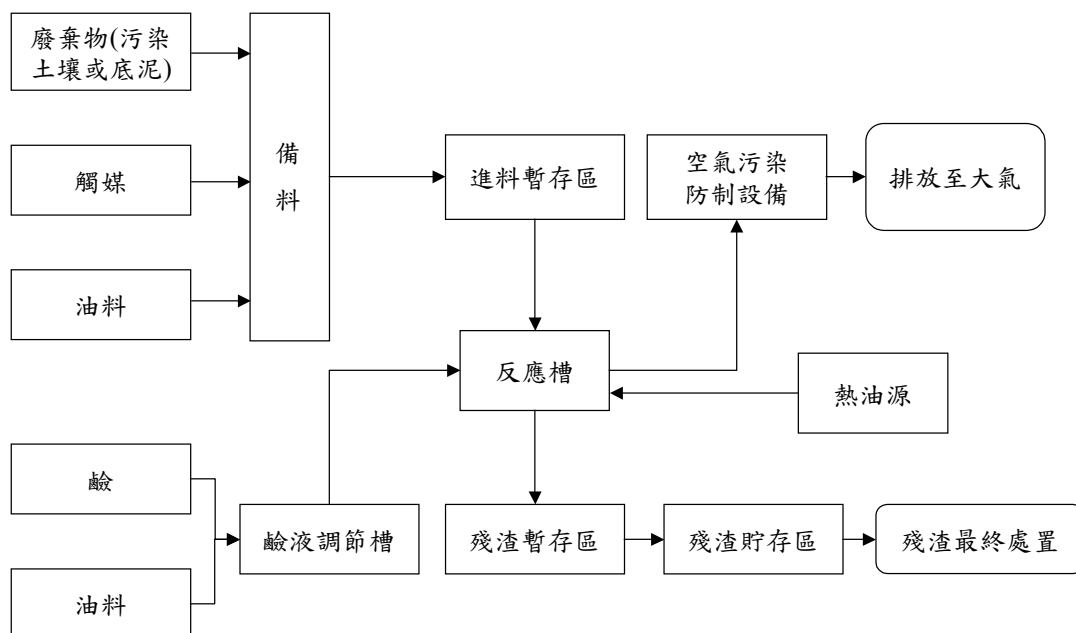


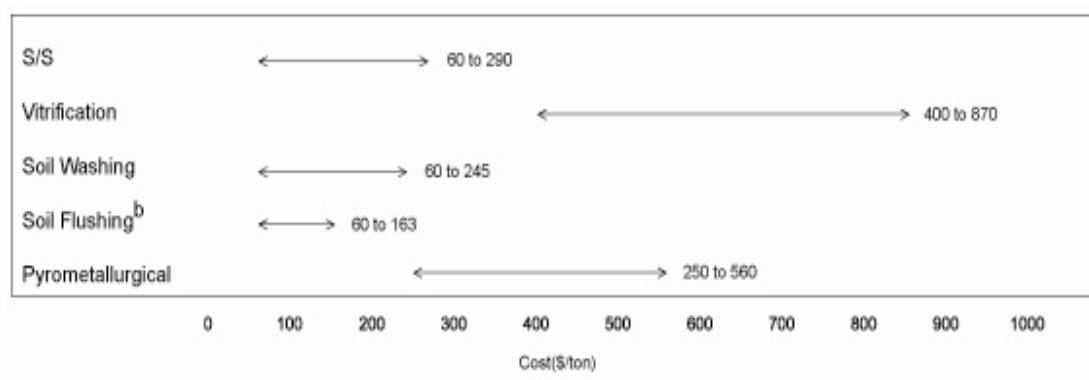
圖 5-10 澳洲 Homebush Bay 戴奧辛污染整治之鹼性催化分解法
處理流程圖^[21]

六、CerOxTM

CerOxTM 為離地之電化學反應處理技術，利用最高價態(六價)的銻氧化有機污染物，產生二氧化碳、水及無機酸的酸性氣體，有異於前述 5 項已商業化戴奧辛處理技術，該技術尚處於模廠試驗階段。CerOxTM 利用電化學反應槽，將三價銻氧化成六價銻，反應前，污染土壤須與水混合成流體，再注入電化學反應槽所產生之六價銻於流體中，利用 sonication 攪動，將流體導入液態反應槽內，液態反應槽於 90~95℃ 之溫度下，將流體中之有機污染物予以破壞，在反應過程中，六價銻被還原成三價銻，三價銻與未反應的六價銻將會在電化學反應槽中予以回收，而處理後土壤將會從處理系統中移出；液態反應槽中所產生的廢氣，一般包括二氧化碳、氯氣與未處理的揮發性有機物等，廢氣將在氣態反應槽中，利用六價銻破壞揮發性有機物，再經由洗滌塔移除酸性氣體，最後排放至大氣。

5.1.9 整治列車技術

圖 5-11 提供固化/穩定化法、玻璃化法、土壤清洗與酸洗法、高溫分離法、及現地土壤沖洗法等 5 種金屬污染土壤整治技術單一處理時之處理成本範圍。整治列車(treatment train)技術概念之引進可大幅提升整治技術之處理效率。所謂整治列車係對於受污染場址採取 2 種以上之處理程序，除可提升處理效能，亦可降低整治費用。其包含土壤前處理、物理分離程序(以減少處理量)、後續殘渣及排放氣體之處理、以及其他可提升處理效能之技術，表 5.1.9-1 提供固化/穩定化法、玻璃化法、土壤清洗與酸洗法、高溫分離法、及現地土壤沖洗法等整治技術之整治列車處理程序。



^b : Costs reported in US\$/yd³, assumed soil density of 100 lb/ft³

圖 5-11 金屬污染土壤整治技術處理成本範圍^[3]

表 5-8 整治列車技術彙整^[3]

	固化/穩定化 ^a	玻璃化法 ^a	土壤清洗 與酸洗法	高溫分離法	現地土壤 沖洗法
前處理					
土壤挖掘	E,P	I,E	✓	✓	
去除礫石	E,P	E	✓	✓	
減容	E,P	E	✓	✓	
調整酸鹼度	I,E,P				
還原作用(如 Cr^{6+} 還原至 Cr^{3+})	I,E				
氧化作用(如 As^{3+} 氧化至 As^{5+})	I,E				
去除有機物	I,E				
土壤顆粒物理分離程序	I,E,P	E	✓	✓	
去除水分	P	E		✓	
降低揮發性金屬之揮發性 (如 As_2O_3 轉化至 $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$)		E			
加入高溫還原劑				✓	
顆粒均勻化程序				✓	
沖洗液輸送及萃取系統					✓
設立阻絕層	I,E,P	I	✓		✓
後處理/殘渣管理					
土壤殘渣處理	I,E,P	E		✓	
設立阻絕層	I,E,P	I,E			✓
排放氣體處理	I,E,P	I,E		✓	
場址鋪面以利後續使用	P				
萃取液回收金屬程序(如離子交換等)			✓		
滲出液之處理與再利用			✓	✓	
沖洗殘渣之固化/穩定化			✓		
固相程序之殘渣處理			✓		
液相程序之殘渣處理			✓		✓
爐渣及飛灰之固化/穩定化				✓	
爐渣及玻璃化產品再製建材		E			
金屬/金屬化合物再利用				✓	
金屬/金屬化合物再處理				✓	
沖洗液處理/處置					✓

^a 處理技術又區分為三類：I=現址程序；E=離地程序；P=聚合物微匣限(離地程序)

5.2 地下水污染整治技術

5.2.1 抽取處理法

抽取處理法是一項針對飽和層地下水中溶解性污染物之整治方法，並兼具控制污染團之擴散，因此本法除可歸類為整治技術外，亦可歸類屬於阻絕(containment)技術的一種，與水力阻絕(hydrodynamic isolation)方法類似。抽取處理法主要包括兩個部分，即抽取井及地面廢(污)水處理設備。抽取井的設計視場址特性而定，而地面廢(污)水處理設備則視污染物特性而定，通常地下水一旦抽出後，其處理方法與廢水處理差異不大。典型之抽取處理法如圖 5-12 所示。

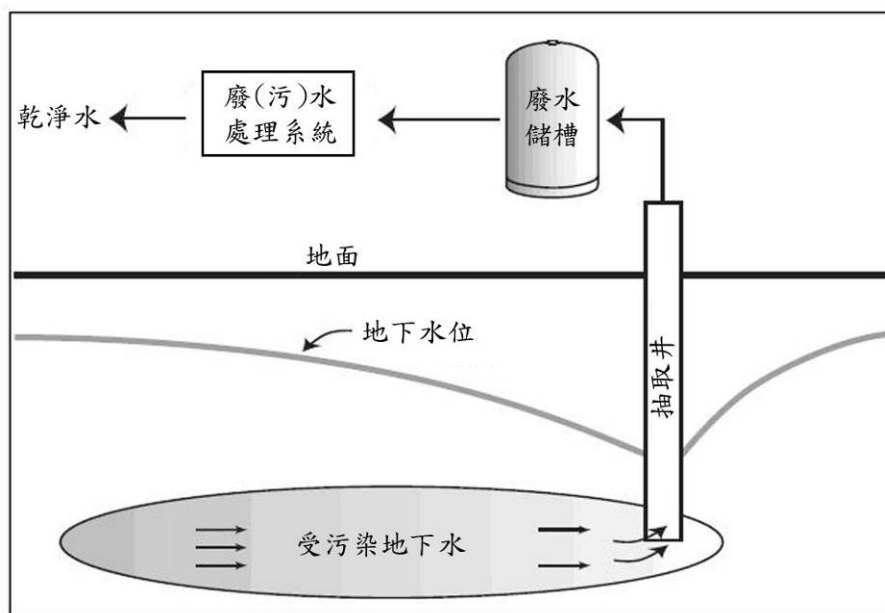


圖 5-12 抽取處理系統^[22]

抽取處理法適用於處理溶解度大之污染物，場址條件則水力傳導係數高 ($>10^{-5}$ cm/sec)、土壤地質條件均勻、有機質含量低之砂質含水層。該方法整治期程一般很長，且往往在停止抽水後會有污染物濃度回升(rebound)之現象，因此常有抽取一段時間後，停止一段時間後再抽水之操作。

5.2.2 沉澱及共沉澱法

一、技術介紹

沉澱法係使用化學藥劑直接將溶解態之污染物轉化為非溶解狀態之程序；而共沉澱法係將膠凝態(colloidal form)或懸浮態(suspend form)

之污染物與其他沉澱物(外加化學藥劑)結合後而沉澱之程序。因此沉澱及共沉澱法必須包含下列步驟：

- (一) 將處理之化學藥劑與待處理液充分混合；
- (二) 藉由沉澱及共沉澱機制，或兩者兼具，產生固體物；
- (三) 進行固體物與處理液分離程序。

圖 5-13 為典型之沉澱及共沉澱法之處理程序，其視需要進行氧化及還原之前處理程序，然後進行 pH 值調整及添加沉澱劑或膠凝劑，經適當時間反應後，再經由過濾或沉澱機制將固體物與澄清液分離。常使用之化學藥劑包括：

- (一) 鐵鹽(如氯化鐵、硫酸鐵、氫氧化鐵)
- (二) 硫酸銨、硫酸鎂、硫酸銅
- (三) 氫氧化鋁
- (四) 石灰、氫氧化鈣
- (五) 硫化物

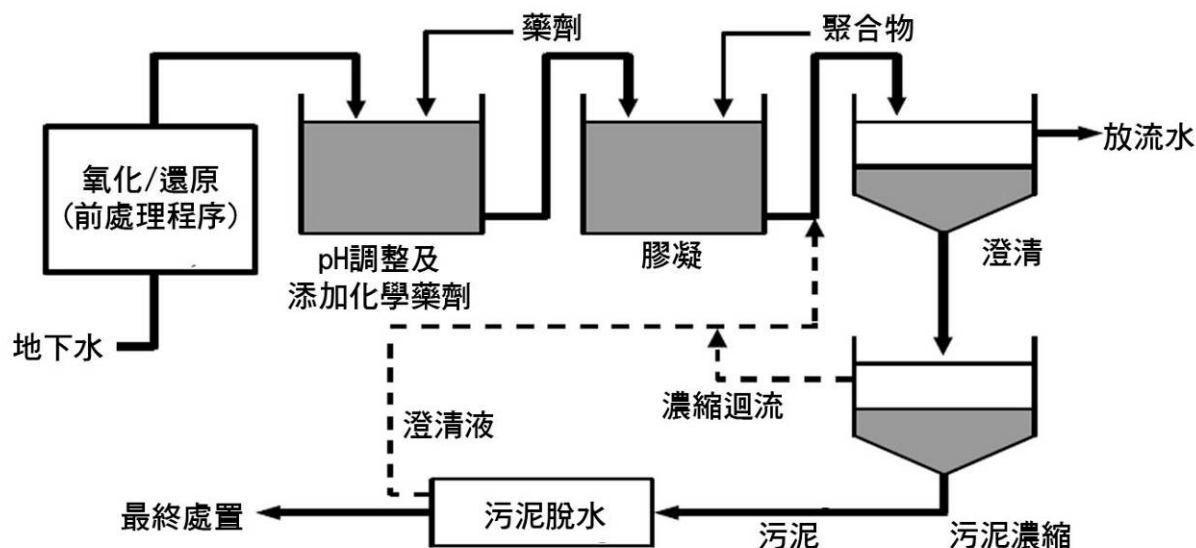


圖 5-13 沉澱及共沉澱處理系統^[23]

二、影響因素^[10,24]

- (一) 重金屬氧化態：由於重金屬之氧化態影響其溶解度、移動性、降解性等性質，因此也影響其處理效能。如以砷(As)為例，As(III)之溶解性較高，將降低沉澱及共沉澱法之處理效率，因此若將其氧化為 As(V)

將提升處理效率。而砷金屬之溶解度尚與 pH 值、金屬化合物型態、及其他共存離子之影響。

- (二) pH 值：環境酸鹼度與重金屬存在型態有密切關係，應在重金屬溶解度最小之酸鹼度環境下進行，方可使沉澱及共沉澱法處理效率最適化。
- (三) 其他共存離子：其他離子之存在將直接影響處理效率。對於以氯化鐵為膠凝劑處理砷金屬之程序中，如硫酸根存在時，將與氯化鐵反應，而降低砷金屬之去除效率，然而若鈣或鐵離子之存在，則將提升此程序之去除效率。

三、技術適用性及優缺點^[24]

- (一) 沉澱及共沉澱法為一離地處理技術。
- (二) 適合受污染之地下水、滲出水、礦區排放水、地表水、工廠廢水、及自來水之處理。
- (三) 處理後將會產生污泥，需進行脫水及最終處置，將衍生處理經費之增加。
- (四) 由於化學藥劑之存在及重金屬污染物本身之濃縮作用，此法處理後產生之污泥極有可能成為有害性廢棄物，須經固化/穩定化等技術處理後，再進行最終處置。

四、成本分析

沉澱/共沉澱技術之經費資料相當有限，茲彙整美國 3 個受到砷、1,2-二氯乙烷(1,2-dichloroethane)、氯乙烯(vinyl chloride)場址之經費分析資料如表 5-9 所示。其中 Vineland Chemical Company 案例之經費係依整治列車所有經費進行估算，因此，年維修費高達美金 4 百萬元。

影響處理經費之因素包括^[10,24,26]：

- (一) 化學藥劑種類：化學藥劑屬於沉澱/共沉澱技術所需之耗材，將影響處理費用，如使用次氯酸鈣將較過錳酸鉀較為便宜。
- (二) 化學藥劑劑量：處理費用將隨著化學藥劑劑量增加而增加，且由於化學藥劑劑量增加，亦將導致污泥產量增加，而又將增加污泥處理費用。
- (三) 處理目標值：不同之處理程序可達到不同之處理目標，當要求目標愈高，愈需要結合多種處理程序，自然將提升處理費用。

(四) 污泥處理量：沉澱/共沉澱技術所產生之污泥可能視為有害廢棄物，需進行後續處理，以維護環境，因此此處理費用亦應列入經費估算項目。

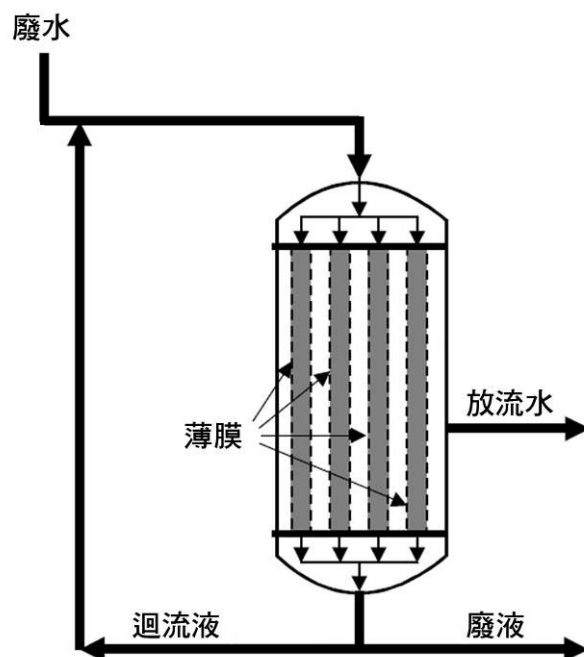
表 5-9 沉澱/共沉澱法經濟分析案例^[23, 25]

場址	處理量	污染物	設備費	年維修費	單位廢水處理費
Vineland Chemical Company	1,400 加侖/分鐘	砷	—	US\$ 4 百萬元	—
Winthrop Landfill	65 加侖/分鐘	砷、1,2-二氯 乙烷、氯乙 烯	US\$ 2 百萬元	US\$ 25 萬元	—
Energized Substation in Florida	44 百萬加侖	砷	—	—	US\$ 0.0006 元/加侖

5.2.3 薄膜過濾法

一、技術介紹

所謂薄膜過濾為利用半滲透性薄膜來分離水相污染物(圖 5-14)，而此半滲透性薄膜對於通過物質具選擇性。薄膜過濾分為 4 種形式：微過濾(microfiltration)、超過濾(ultrafiltration)、奈米過濾(nanofiltration)、逆滲透(RO)，以上 4 種程序均需施加壓力再利用污染物粒徑與薄膜孔徑之差異而達到分離之目的^[27]。施加壓力大小與污染物顆粒尺寸有關，奈米過濾與逆滲透需施加較高之壓力(50~150 psi)，而微過濾與超過濾則僅需 5~100 psi 之壓力^[24]，低壓程序係以物理篩除(sieving)機制去除污染物，而高壓程序則以在薄膜表面之化學擴散(chemical diffusion)機制去除污染物^[24]。

圖 5-14 薄膜過濾系統^[23]

微過濾則通常與沉澱/共沉澱法共同處理與固體物結合之金屬，其適合去除分子量大於 50,000 或粒徑大於 0.05 μm 之顆粒；對於溶解於水中且顆粒相當小之金屬(如砷)，只有奈米過濾及逆滲透可有效除之^[24]，逆滲透為一高壓程序，主要移除與總溶解固體物結合之金屬離子，其適合去除分子量之範圍介於 1~20,000 (the molecular cut off)；奈米過濾亦為一高壓程序，適合處理造成硬度之二價金屬離子，其適合去除分子量之範圍介於 150~20,000 (the molecular cut off)。

二、影響因素

- (一) 懸浮性固體物、高分子量溶解性固體物、有機物、及膠凝物：左列這些物質之存在將造成薄膜垢化(fouling)現象，而降低處理效率。
- (二) 重金屬氧化態：不同氧化態之重金屬顆粒尺寸有異，因而影響處理效率，如 As(V)之薄膜過濾處理效率較 As(III)為佳，乃因 As(V)較 As(III)為大而容易被薄膜過濾之故。
- (三) pH：環境酸鹼度將影響薄膜表面之帶電性，進而影響薄膜對重金屬之吸附效能。
- (四) 溫度：處理液溫度較低時將減低薄膜流通量(membrane flux)，而降低處理效率，此時可提升系統壓力或增加薄膜面積來克服之。

三、技術適用性及優點

- (一) 薄膜過濾廣泛適合處理溶解性污染物及懸浮性固體物。
- (二) 適合受污染之地下水、地表水、工廠廢水、及自來水之處理。
- (三) 逆滲透及奈米過濾不須添加化學物質及可達到分離效果。
- (四) 薄膜過濾系統可採連續或批次操作。
- (五) 處理效率將受到處理液中污染物及其他固體物、有機物之影響，因此較適合用於處理雜質較少之水體，如地下水與自來水。
- (六) 薄膜過濾通常當作其他技術之後續處理程序，以達到處理目標值。

四、成本分析

影響處理經費之因素包括^[24,27,28]：

- (一) 薄膜過濾種類：不同種類之薄膜將直接影響處理成本。
- (二) 處理液特性：視處理液濃度及雜質特性而定，可能在進行薄膜過濾前，需進行前處理，亦將增加處理成本。
- (三) 處理後廢液特性：視廢液濃度而定，可能在進行最終處置前需進行其他處理程序。
- (四) 影響薄膜過濾性能因素：在本節「二、影響因素」所提及之情形皆影響處理成本。

5.2.4 吸附法

一、技術介紹

吸附技術係採用吸附劑置於固定床管柱中，使待處理液經過吸附劑表面達到濃縮，而降低液相濃度(圖 5-15)。吸附技術有時會與沉澱/共沉澱、離子交換、過濾共同使用，然而吸附往往成為最主要去除機制。當吸附劑達到飽和，則需進行反沖洗、再生、中和、洗滌等 4 步驟之再生程序，以維持吸附劑效能。常用之吸附劑為：

- (一) 活性鋁(activated alumina)^[27]

可利用氫氧化鈉進行再生，中和液則採用硫酸，進行此程序將產生污泥，需進行後續處理。

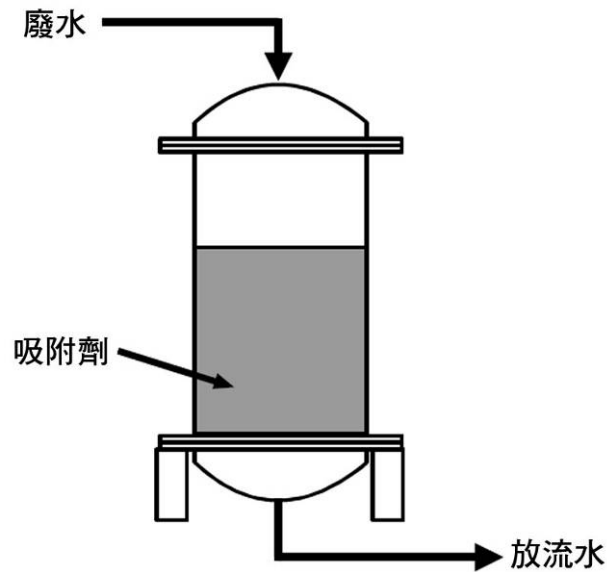


圖 5-15 吸附處理統^[23]

(二) 活性碳(activated carbon)^[29]

大多用於地下水及自來水中有機物之移除，將活性碳與銅離子或鐵離子進行反應後，將可用於砷之吸附，其吸附量分別為 0.048 g/g-Cu-AC 及 0.2 g/g-Fe-AC。

(三) 粒狀銅-鋅複合金屬

(四) 粒狀氫氧化鐵、氧化鐵砂^[24]

可被利用於自來水中砷之移除，且通常與氧化、沉澱/共沉澱、離子交換或過濾一同使用，其再生程序與活性碳類似，利用氫氧化鈉再生，再以強酸(如：硫酸)中和即可。

(五) 經界面活性劑改質之沸石

將沸石與界面活性劑(如:hexadecyltrimethylammonium bromide)反應，其對於砷之吸附量達 0.0055 g/g。

二、影響因素^[27,29,30]

(一) 垢化：總懸浮固體物、有機物、固體物、二氧化矽及雲母之存在，皆會引起吸附劑垢化，阻塞流體通過及減少接觸時間，因而降低處理效率。

(二) 重金屬氧化態：文獻顯示，吸附效率受重金屬氧化態之影響，如 As(V) 之吸附處理效率較 As(III) 為佳。

- (三) 處理流量：增加吸附處理單元之流量時，將降低污染物之吸附。
- (四) 待處理液 pH 值：依污染物特性而定，調整適當之 pH 值可達到最大吸附效率，如以活性鋁(activated alumina)處理砷廢水，在酸性情形下吸附較佳。

三、技術適用性及優點

- (一) 適合受污染之地下水及自來水之處理。
- (二) 待處理水中若總懸浮固體物、有機物、二氧化矽存在時，將造成吸附劑垢化，影響吸附效能。
- (三) 活性碳再生多以熱脫附為主，後續需裝設空氣防制設備，以處理揮發性金屬蒸氣。
- (四) 競爭吸附將降低吸附效率，對於金屬而言之吸附優先順序為：
 $\text{Th}^{4+} > \text{Fe}^{3+} > \text{Al}^{3+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Ba}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Cs}^+ > \text{Rb}^+ > \text{K}^+ > \text{Li}^+ > \text{Na}^+$
 對於類金屬(如：砷)化合物，其吸附優先順序為：
 $\text{OH}^- > \text{H}_2\text{AsO}_4^- > \text{Si}(\text{OH})_3\text{O}^- > \text{F}^- > \text{HSeO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{H}_3\text{AsO}_3$

四、成本分析

文獻顯示^[29]，以吸附技術處理受金屬污染水體，處理成本約為 US\$0.003~0.76/gallon。影響處理經費之因素包括^[27,29,31]：

- (一) 污染物濃度：若有許多高濃度之競爭性污染物存在，則需增加置換及再生頻率，以維持吸附效能，此舉將增加處理成本。
- (二) 吸附劑耗用量：若無法再生使用之吸附劑，則需進行處理，因此若再生效果不佳之吸附劑，將衍生較高之吸附劑費用。
- (三) 影響吸附性能因素：在本節「二、影響因素」所提及之情形皆影響處理成本。

5.2.5 離子交換法

一、技術介紹

離子交換法係一種物理/化學分離技術，將液相中污染離子與固相中離子進行交換，進而達到液相淨化之目的(圖 5-16)。而此固相介質稱為離子交換樹脂，其係合成聚合物，表面帶有許多官能基，可與污染離子進行交換，其主要有 4 種型態^[24]：

- (一) 強酸型
- (二) 弱酸型
- (三) 強鹼型
- (四) 弱鹼型

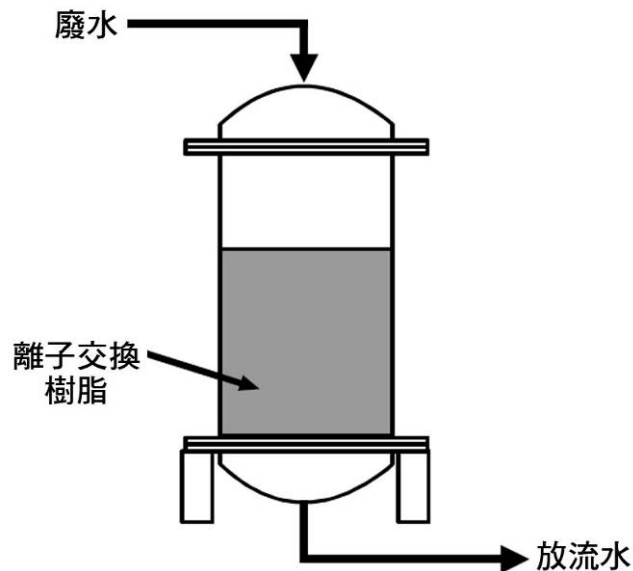


圖 5-16 離子交換系統^[23]

強酸型及弱酸型離子交換樹脂主要用於處理陽離子，而強鹼型及弱鹼型離子交換樹脂主要用於處理陰離子。因此對於重金屬而言，應使用強酸型及弱酸型離子交換樹脂，而對於類金屬(如砷)，因其以陰離子型態存在於液相，故以鹼型離子交換樹脂進行處理，尤以強鹼型為佳。

離子交換樹脂達到飽和時，必須定期再生，以維持交換能力，再生程序有 3 個步驟：

- (一) 反沖洗
- (二) 再生
- (三) 洗滌

一般而言，當處理達 300~60,000 個離子交換柱體積後，樹脂需進行再生，而再生液通常可重複使用 25 次後再進行處理，最後洗滌步驟僅需數個柱體積即可^[27]。

離子交換管柱可串聯使用，以減低再生頻率，通常前端處理之管柱

先進行再生，再生後置於後端使用。

二、影響因素^[24,27,30]

- (一) 重金屬氧化態：文獻顯示，處理效率受重金屬氧化態之影響，如 As(III) 無法以離子交換法移除之。
- (二) 競爭性離子之存在：當競爭性離子存在時，將與待處理金屬競爭樹脂位置，導致需增加再生頻率，方可維持處理效能。
- (三) 垢化：總懸浮固體物、有機物、鈣及鐵之存在，皆會引起離子交換樹脂垢化，阻塞流體通過及減少接觸時間，因而降低處理效率。
- (四) 待處理液 pH 值：依污染物特性而定，調整適當之 pH 值可達到最大離子交換效率，如以強鹼氯離子型樹脂，對於砷廢水處理之最佳 pH 值為 6.5~9，在此範圍外處理時，去除效率明顯下降。

三、技術適用性及優點

- (一) 適合受污染之地下水、地表水及自來水之處理。
- (二) 待處理水中若總懸浮固體物、有機物、鈣及鐵存在時，將造成樹脂垢化，影響處理效能。
- (三) 若使用氯離子型交換樹脂，處理液將含高濃度氯離子，造成腐蝕性；離子交換程序亦會降低處理液 pH 值。
- (四) 廢棄樹脂含有大量金屬，需進行妥善處理，以維護環境。
- (五) 置換能力將影響處理效能，對於金屬離子而言，置換優先順序為：
 $\text{Th}^{4+} > \text{Fe}^{3+} > \text{Al}^{3+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Ba}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Cs}^+ > \text{Rb}^+ > \text{K}^+ > \text{Li}^+ > \text{Na}^+$
 對於類金屬(如：砷、硒)化合物，其置換優先順序為：
 $\text{HCrO}_4^- > \text{CrO}_4^{2-} > \text{ClO}_4^- > \text{SeO}_4^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Br}^- > (\text{HPO}_4^-, \text{HAsO}_4^{2-}, \text{SeO}_3^{2-}, \text{CO}_3^{2-}) > \text{CN}^- > \text{NO}_2^- > \text{Cl}^- > (\text{H}_2\text{PO}_4^-, \text{H}_2\text{AsO}_4^-, \text{HCO}_3^-) > \text{OH}^- > \text{CH}_3\text{COO}^- > \text{F}^-$

四、成本分析

處理成本資料並不完善，茲將影響處理經費之因素彙整如下^[24]：

- (一) 樹脂再生頻率：再生頻率愈高，將可減少廢棄樹脂處理費用及操作費用。
- (二) 競爭性離子存在：硫酸根(SO_4^{2-})會與砷競爭樹脂位置，將增加樹脂再生頻率，造成操作費用增加。

(三) 影響離子交換性能因素：在本節「二、影響因素」所提及之情形皆影響處理成本。

5.2.6 透水性反應牆

一、技術介紹

透水性反應牆(Permeable Reactive Barrier, PRB)，係指於受污染場址地下建造一個永久性、半永久性或可替代的單元，於單元中置入反應的材料，令受污染地下水，流經此處理單元，如圖 5-17 所示。

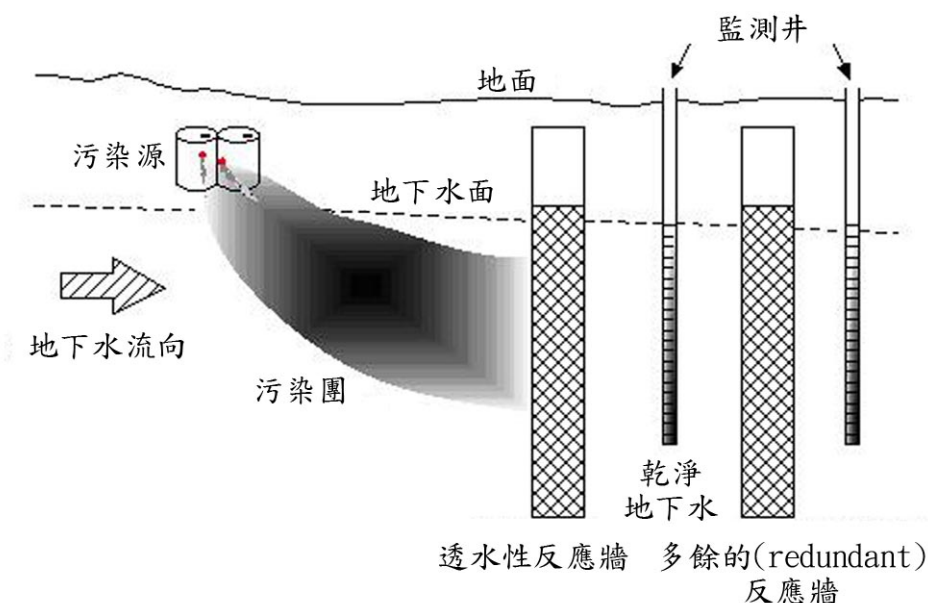


圖 5-17 典型透水性反應牆示意圖^[32]

污染物與處理單元中反應性材料會產生物理、化學或生物作用，在現地中被破壞或固定，藉由使用不同的材料，透水性反應牆可處理不同的有機或無機污染物，常見的反應牆可分成吸附/吸收、沉澱及降解性等 3 種^[32]，其可處理之污染物種類及反應性材料，詳見表 5-10。吸附/吸收性材料可用於處理無機物或有機物，例如活性炭、沸石及有機性皂土等均曾被測試於有機物之處理；泥炭土、鐵氧化物、離子交換樹脂、Chitosan beads 及沸石等，均曾用於無機物之處理。沉澱性處理牆用於重金屬之去除，主要是藉由改變區域性環境狀況，例如 pH 值或氧化還原電位，形成低溶解性的金屬氧化物，造成沉澱。通常使用之反應性材料包括鐵鹽、磷酸鹽、飛灰、石灰及零價金屬等。降解性的反應牆則包括生物降解及非生物降解等 2 種，前者包括例如使用釋氧劑(oxygen releasing compound, ORC)增加水中溶氧，以達到降解水中汽油相關污染物(如苯、

甲苯、乙苯等)之目的，或利用固定態微生物達到去除水中污染物的方法。此外，使用鋸木屑作為碳源，以去除硝酸鹽也曾被使用。另一方面，非生物性的降解，最常見的是使用零價鐵降解水中含氯碳氫化合物，亦有研究顯示零價鐵可用於還原水中硝酸鹽^[32]。

表 5-10 透水性反應牆處理技術的種類^[32]

污 染 物	反 應 型 態	反 應 物 材 料
有機物		
含氯碳氫化合物	降解	零價鐵
芳香羥化合物		固定態微生物
硝基苯		氧氣釋放化合物
多氯聯苯		聯二亞硫酸鹽
多環芳香羥		
	吸收/吸附	沸石 (zeolite)
		有機性皂土 (organobentonite)
		活性碳
無機物		
重金屬	吸收/吸附	泥碳土 (peat)
放射性元素		鐵氧化物
硝酸鹽		皂土
		沸石
	沉澱	零價鐵
		聯二亞硫酸鹽
		石灰岩
	降解 (硝酸鹽)	堆肥、木屑

二、技術適用性與優點

透水性反應牆適用於處理 VOCs、SVOCs 以及無機物，但對於 LNAPL 效果則較不佳。透水性反應牆具有下述幾項優點：

- (一) 建造成本比傳統之抽取處理法低。
- (二) 安裝設置及阻絕污染物比其他處理技術比較快速。

- (三) 安裝設置過程簡單，只和該地區土壤型態有關。
- (四) 低操作成本，不需要連續額外輸入能量。
- (五) 低維護成本，設置後，只需要定期監測地下水及更換處理單元。
- (六) 較少之場址表面破壞及人力成本。
- (七) 現地處理，沒有廢水排放問題。

而在技術上有以下限制：

- (一) 反應材料有反應容量限制，可能需定期更換材料。
- (二) 透性可能因為金屬鹽類沉澱或生物活動副產物增加而降低。
- (三) 可能因為現行施工技術與成本，而使反應牆深度與寬度受限。
- (四) 處理材料之成本。
- (五) 通常僅適用於地下水中溶解性污染物。

三、透水性反應牆之設計與施工

(一) 透水性反應牆之類型

反應牆的建造上，一般可分為連續式反應牆(continuous reactive barrier)及漏斗通道式反應牆(funnel and gate system)兩大類。然而通常可分成 4 種型式的安排^[15]，如圖 5-18 所示。連續式反應牆，整個單元均填充反應性材料，如圖 5-18(a)；漏斗通道式反應牆則包含不透水牆及污染物通道，漏斗部分代表低透水性材料，可導引地下水流至透水較高的反應牆(通道)中，以節省反應材料的用量，如圖 5-18(b)；多門式反應牆，用於污染團較寬的情況下，如圖 5-18(c)所示；多重反應材料式的反應牆，可填充不同特性材料，以處理多種污染物或達到更好的處理效果，如圖 5-18(d)所示。有關反應牆之安排，可參考 Starr and Cherry^[33]。該文章對漏斗與通道之比例，地下水流速、流向之關係，均利用二維地下水模擬軟體做過分析，提供進一步場址概念的資訊。

(二) 反應牆的設計

反應牆的設計，首先必須了解受污染場址現地之特性，包括水文、地質及化學特性。由污染團大小、地下水移動方向及速度、含水層之透水性及邊界等，才可決定反應牆之位置與大小。除場址特性外，反應牆設計需考慮的幾個重要參數包括：反應材料的選擇(包含材料種類、粒徑分布及混合成分)，反應牆內之停留時間及反應區的大小(配合更換期限)。材料的選擇主要考慮污染物的種類，設

計上通常可由可行性研究取得所需要之參數。例如可藉由批次性實驗求得材料之反應性，如降解半衰期、吸附動力及吸附量等；由地下水管柱實驗模擬現地下水流速及反應牆內的停留時間，並且可同時得到污染物沉澱或飽和所達到的時間，以及水質變化的情形。另一方面，文獻中亦可得到反應動力參數，例如針對零價鐵對含氯碳氫化合物進行降解動力文獻回顧^[34]。

詳細設計規範可參考國外相關報告，如參考美國貝泰(Battelle)公司之設計指引，並參酌其他相關論文與報告，描述透水性反應牆之詳細設計規範^[35]。整個透水性反應牆設計方法及詳細流程圖，包括初期場址評估、場址特性、反應介質選擇、處理能力試驗、模式和工程設計、建造方法、監測計畫等，其步驟可參考圖 5-19 及 5-20。

(三) 反應牆的建造

反應牆的建造方法多數系統使用傳統開挖及回填的方式，將反應性材料放入地下系統中，但近年來則開始有直接注入的方法。傳統開挖及回填的方式具有較好之品質管制與較易成功裝設反應牆之優點，相對而言直接注入法則有可達深度較深、反應牆較薄、污染土壤產生量少、機具較小等優點^[35]。

傳統開挖及回填的方式用於建造不透水牆的部分(漏斗部分)的施工法，則較為使用的包括鋼板樁及泥漿牆法。此外，尚有包括溝渠機，深層土混合，高壓噴漿及垂直水力破裂等方法。傳統的開挖方法可使用怪手等機具進行，一般開挖機具大約可挖至 35-70 英尺左右的深度。通常淺的溝渠也許不需要支撐，但多數的反應牆在回填材料前，通常必須使用合適的支撐方法，包括結構牆(例如溝箱)及泥漿等 2 種方法。溝箱是開挖處理牆反應單元時最常用的方法，該法是利用多孔式或鐵網的箱子作為溝渠的支撐，但該法在最終施工階段需時較久，造成經濟上的不利，因此有其他方法，例如沉箱法、連續溝渠機及生物可分解泥漿法等。使用泥漿法作為溝渠回填前的支撐，通常在經濟成本上較節省，但常用的皂土泥漿會阻塞透水性反應牆，必須使用生物可分解的聚合物泥漿作為支撐(例如由豆類製造而成之 Guar Gum，是一種天然食物添加劑)。此種泥漿與反應性材料待埋入地下後，可生物分解形成多孔性介質，作為反應牆材料的一部分。溝渠機通常用於開挖較淺的溝渠，大約在 20-30 英尺左右，開挖寬度則約為 12-36 英尺間。藉由溝箱的安裝，

溝渠機施工時可同時放入反應性材料。

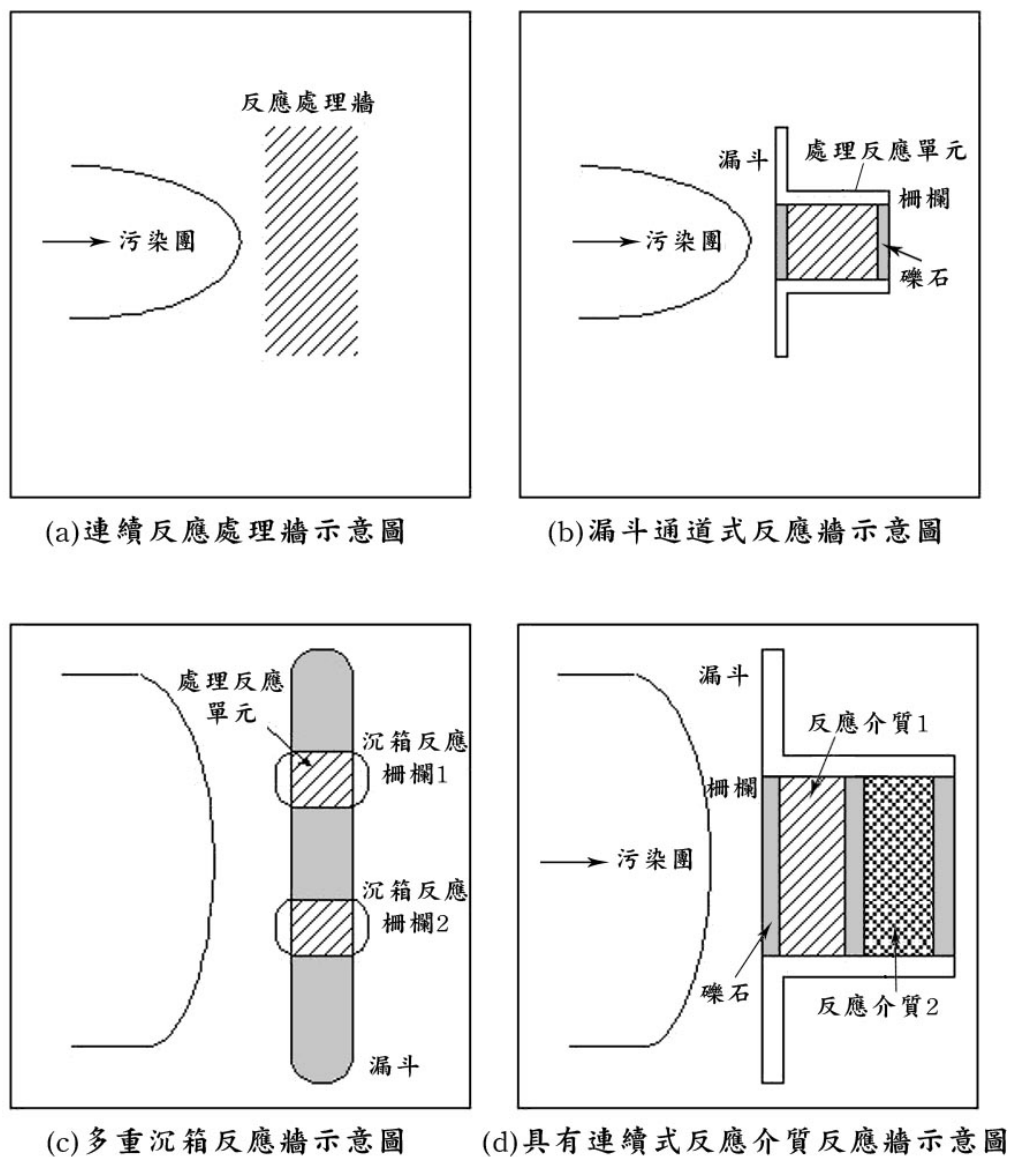
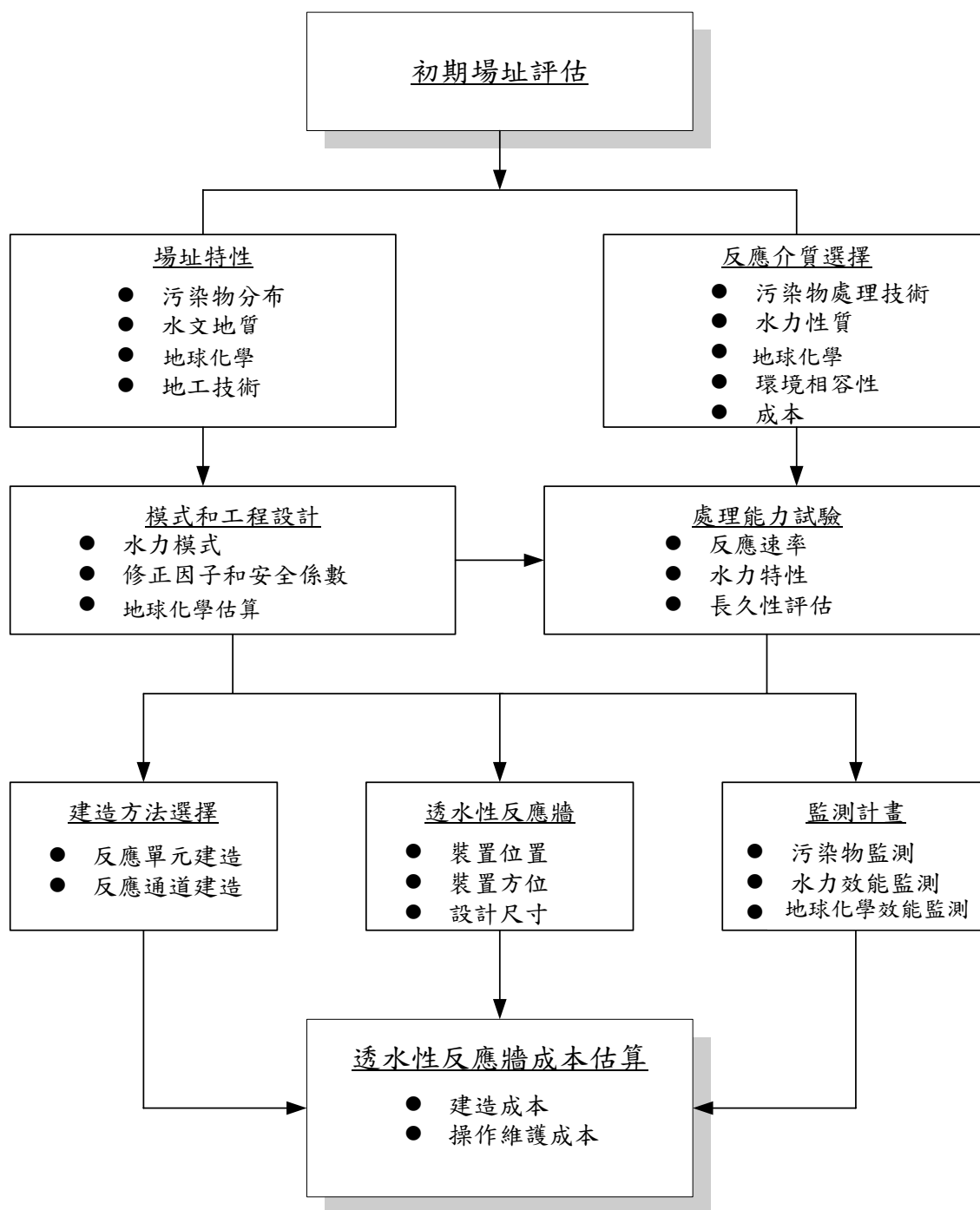


圖 5-18 各類型透水性反應牆^[15]

圖 5-19 透水性反應牆之設計方法^[2]

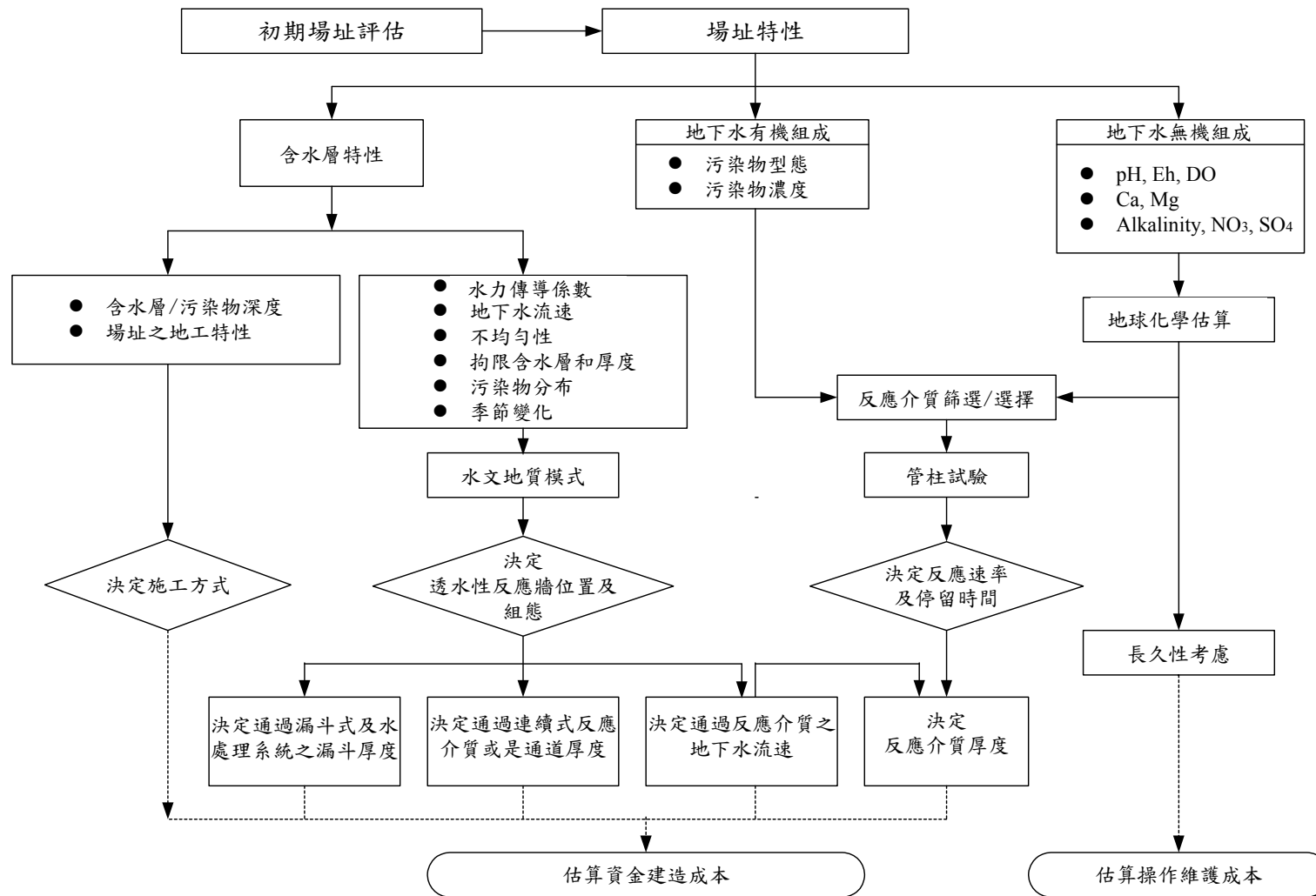


圖 5-20 透水性反應牆之設計流程圖^[2]

深土混合法係由日本開始使用^[36]，主要是利用大型螺旋鑽(直徑約 3-8 英呎)鑽入土中同時注入皂土及水或水泥、皂土及水的泥漿，以建造不透水阻隔牆，亦可以用於注入鐵顆粒與生物可分解性泥漿。高壓注入法則是常用於建築工地中，作為注入薄漿以改善地質穩定的方法，也曾被用於做不透水牆的方式，其優點在於可靠近管線或石塊等阻隔物的邊緣施工，且設備小，搬運費用低。該方法係在鑽頭附近加入噴頭，一旦鑽至適當深度後，地面上的泵即增加壓力使泥漿注入，小的土壤顆粒會被帶至地面，而粗顆粒土壤及泥漿則留在地下。若在取出噴頭時進行旋轉並噴漿的動作，則噴出的材料會形成 3-7 英呎直徑大小的柱子，視注入量及抽出速度而定，反應性的材料可佔柱子的 75 %左右。若噴頭取出時不作旋轉，則僅大約 5 英吋的薄牆。鐵粒及 Guar gum(一種天然食物添加劑)的混合漿作注入劑，包括柱形牆及薄牆均已成功應用於現地場址中，其配合之方法，除上述方法外，利用水力破裂的方式也曾成功測試過。

(四) 成本分析

透水性反應牆的設置成本主要包括 3 個部分，即反應性材料費、通道設置費及漏斗部分的設置費。視使用材料、與裝置尺寸而定，整個場址之設置費常介於美金 3 至 150 萬元間^[15]。一般而言，以較淺層的不透水牆部分，其設置費約介於每平方英呎美金 10-25 元之間。反應性材料費用的估算，首先須了解反應性材料用量，可藉由反應動力配合地下水流速等特性，進行估算。在通道裝設費用部分，一般是以體積進行估算，經由單位面積所需通道的體積方式，再乘以單位即可得到成本數值。一般而言，每一立方英碼約需美金 75-400 元，此部分在整個成本上佔重要的一部分。若依美國地下水整治技術中心(Groundwater Remediation Technology Analysis Center, GWRTAC)統計 30 個使用本技術之場址，平均每個場址約為 45 萬美金。

(五) 反應牆水質監測^[37]

當透水性反應牆已經設計和裝置完成，該場址必須設置適當的監測系統，藉由地下水採樣和分析污染物，以確認污染物已經被反應介質降解，其處理過後之地下水必須符合相關法規的需求。另一方面，監測系統也可以評估透水性反應牆之設計操作效能。根據監測系統的功能類別，監測系統可分成，符合性監測(compliance

monitoring)和操作性監測(performance monitoring)兩大類，前者主要在於監測受污染場址地下水中污染物是否超過法規限值，通常包含一般水質項目(如 pH 值、比電導度、鹼度等)監測及降解產物的監測。在設計監測系統時，除上、下游外，井的數目視場址及整治系統而定，但應能保障受污染地下水不會由阻絕牆及反應牆之上下或左右流至下游。在靠近反應牆區的下流監測井應保持足夠的距離，以避免採樣時由不同來源的水造成混合的情形，但也不應在下游太遠處，以免必須耗費太久時間才可判定反應牆的效果。在反應牆上游的監測井也不可離牆太近，以免採樣時由牆中抽取出的水，造成代表性不足。

操作性監測則主要在於透水性反應牆及不透水牆本身的監測，以了解操作與設計間之差異，並評估處理系統之物理、化學及礦物性質隨時間之改變狀況。與合格性監測不同，操作性監測的監測井通常設於透水牆(或阻絕牆)內或非常接近的地方，由於處理區域一般很小，因此取樣體積上通常比傳統地下水採樣(例如符合性監測樣品)小很多。一般而言，直徑小(例如 2/3 英吋)且井篩短 (<1 英呎)的井或管群可用於此種操作。監測井的設置在較深的透水牆中也滿困難的，例如僅數個百分比的偏差即可能使井在較深的位置跑出牆外，但可用一些簡單的化學參數(例如比電導度)來判定井是否仍在牆中。此外，污染物的降解及轉換，地球化學的指標，處理牆內沉澱物及微生物的累積，甚至於水力特性的變化，也均是反應牆操作性監測的重點。

5.2.7 空氣注入法

一、技術介紹

空氣注入法(air sparging, AS)為現地地下水污染整治技術，亦稱現地氣提法(in-situ air stripping)。空氣注入法係改良土壤氣體抽除法，利用壓力將空氣或氧氣注入地下水中，產生氣泡，促使含水層(飽和層)之地下水污染物溶出，並揮發至氣相進入透氣層(不飽和層)中，為有效控制氣相污染物的流動，一般會結合土壤氣體抽除法(簡稱 AS/SVE)，將氣體抽出至地面處理後予以排放。由於此法必須注入空氣或氧氣，可增加地下水溶氧量及未飽和層氣體氧氣濃度，因此可促進污染物被好氧微生物降解。此外，若在注入空氣中加入甲烷，則可促進含氯有機物(如三氯乙烯)被共代謝微生物降解。一般而言，空氣注入法之整治機制，在初期以

抽除低分子量、高揮性污染物為主，後期則以生物降解去除高分子量、低揮發性污染物。一般空氣注入法如圖 5-21 所示，其優缺點彙整如表 5-11 所示。

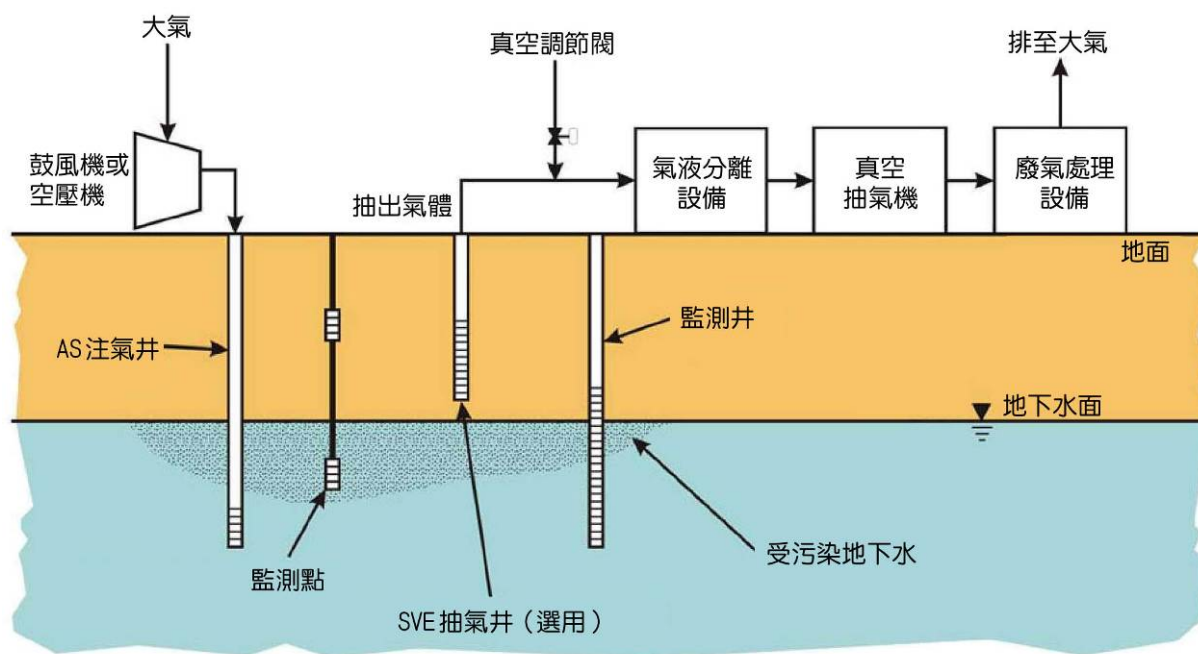


圖 5-21 空氣注入系統示意圖^[38]

表 5-11 空氣注入法優缺點彙整表^[17]

優點	缺點
• 設備容易取得，設置安裝容易。 • 對場址運作之干擾少。 • 整治期程短：在理想情況下，一般整治期程約 1 至 3 年。 • 不必抽出、處理、貯存或處理受污染之地下水。 • 結合土壤氣體抽除法(SVE)，可以增加污染物移除的功效。	• 不適用於自由相(浮油)存在的場址，亦即應先將自由相(浮油)移除後，再應用空氣注入法進行地下水污染整治。 • 不適用於受壓含水層。 • 不適用於交叉分層的地質狀況。 • 部分化學、物理與生物間的交互作用情形，尚未被清楚的研究出來。 • 缺乏設計參考所需之實場與實驗室數據。 • 可能會導致污染物的移動。 • 需要較詳細的先導試驗與監測，以確定氣相污染物是控制在設計的情形下流動。

二、應用

經妥善規劃設計後，空氣注入法可降低揮發性有機物及石油碳氫化合物在地下水中的污染濃度，特別是具中、高亨利常數(低分子量、高揮發性)的有機物，如苯、甲苯、乙苯及二甲苯，對處理柴油及燃料油之功效不大。一般空氣注入法會結合其他處理方式，如土壤氣體抽除法，空氣注入法結合氣體抽除法之各種應用方式，包括間隔配置(spaced configuration)、井叢(nested wells)、平行井(horizontal wells)與垂直井/平行井聯合應用等，如圖 5-22 所示，其中平行井式空氣注入法係針對滲透性較差之土壤及地下水水位較淺之情況。其他改良的應用方式包括將注入氣體改用熱空氣或蒸氣等。空氣注入法一般在高流速(如 6~20 ft³/min 或 0.170~0.566 m³/min)的情形下運作，以維持空氣與地下水及土壤間之接觸並提高氣提作用。

三、處理成效

2000 年，一項針對 49 個空氣注入法整治場址之處理成效研究報告^[39]顯示，由於各污染場址之設計、系統設置技術與操作狀況不同，使空氣注入法整體處理效率亦有所不同，地下水揮發性有機污染物之去除效率由 27%至近 100%不等，易言之，規劃設計良好的處理系統，其處理效率亦較好。此外，一般鑽井技術無法在建築物下方設置平行井，因此，空氣注入法採用平行井時，其設置費用較高，同時有可能造成注氣不均勻的狀況，非必要狀況下，一般空氣注入法不建議使用平行注氣井。

四、技術限制

污染場址應用空氣注入法之限制因素包括：

- (一) 通過含水層(飽和層)之氣流，可能產生不均勻分布狀況，亦即可能造成危害性氣體未被妥善控制的狀況，因此，應瞭解污染物揮發後可能傳輸之狀況，並瞭解潛在受體是否會受到影響，並依受體受影響之情形，設置土壤氣體抽除井。
- (二) 必須考量污染物分布的深度與場址的地質狀況。
- (三) 所有注氣井必須依場址的狀況進行設計。
- (四) 土壤異質性可能形成部分地下水污染區域無法被處理之情況，如圖 5-23 所示。
- (五) 不適用於低滲透性的土壤中。

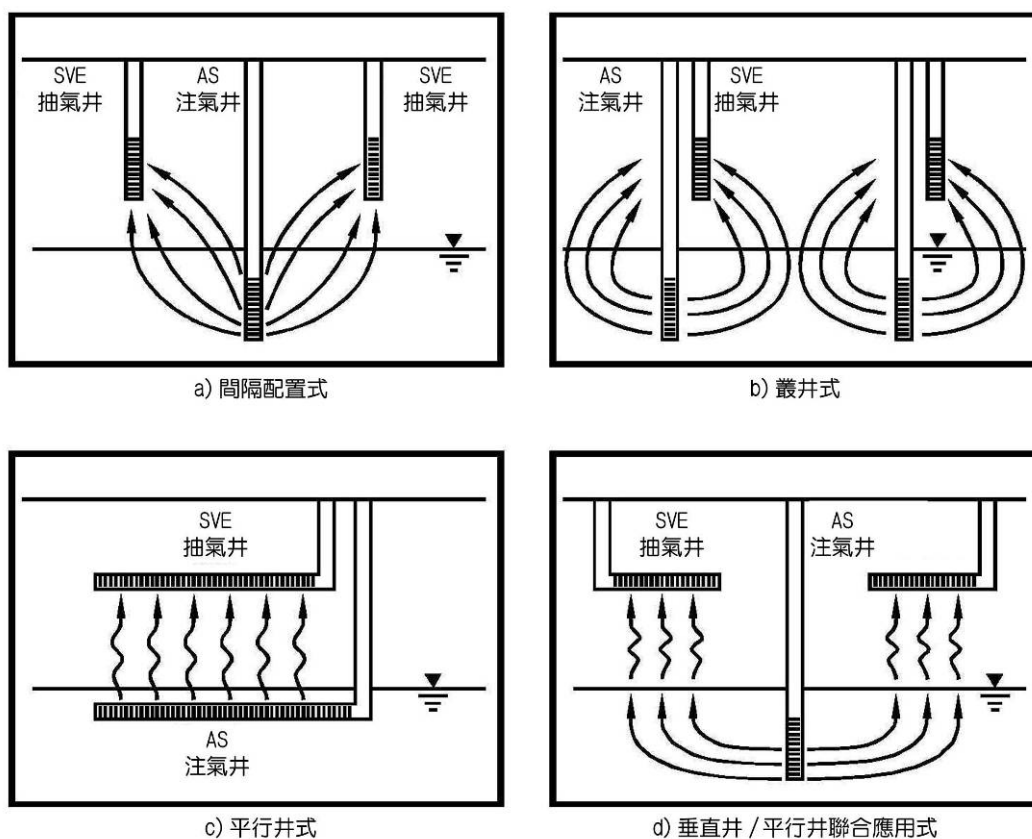


圖 5-22 空氣注入法與土壤氣體抽除法聯合應用類型^[17]

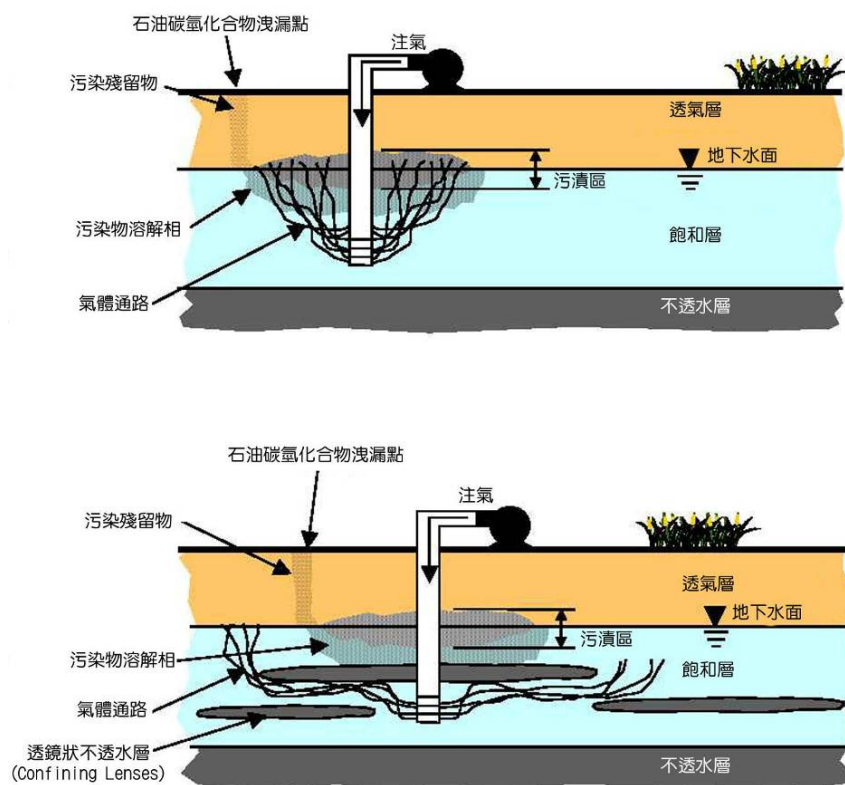


圖 5-23 土壤不均質性造成注入氣體無法通過受污染區之示意圖^[38]

5.2.8 現地地下水生物整治法

一、技術介紹

現地地下水生物整治法(in-situ groundwater bioremediation)係促進固有微生物成長與繁殖，使飽和層中有機成分被生物降解的一種技術。該法可有效降解溶解於地下水中與吸附於含水層基質上的污染物。

生物整治方法必須有刺激與維持生物活動的機制存在，此一機制經常具有供給系統，而供給系統提供電子接受者(如氧或硝酸鹽)、營養鹽(如氮、磷)與能量來源(如碳)等。一般而言，電子接受者、營養鹽是供給系統中最重要的構成成分。

傳統現地地下水生物整治系統包括 1 個或多個地下水抽水井，必要時，應設置處理或移除溶解於地下水中污染物的設備，處理過後的地下水在混合電子接受者、營養鹽與其他必要的物質後，在地下水污染區上游處，被重新注入地下水中。地下水回注的方式包括滲水渠道(infiltration gallery)與注入井等 2 種，分別如圖 5-24 與圖 5-25。在理想的設備配置情形下，能建立一封閉循環的地下水整治系統，所抽取的地下水在不經處理且經混合電子接受者、營養鹽與其他必要的物質後，再被回注於地下水中，而整個整治工作均在現地進行，直到地下水達到整治目標為止。如受污染地下水不被允許回注於地下水體，則可考量以乾淨水源與電子接受者、營養鹽混合後，再回注於地下水體的方式取代，而受污染地下水經處理後予以排放。茲將現地地下水生物整治法之優缺點彙整如表 5-12 所示。

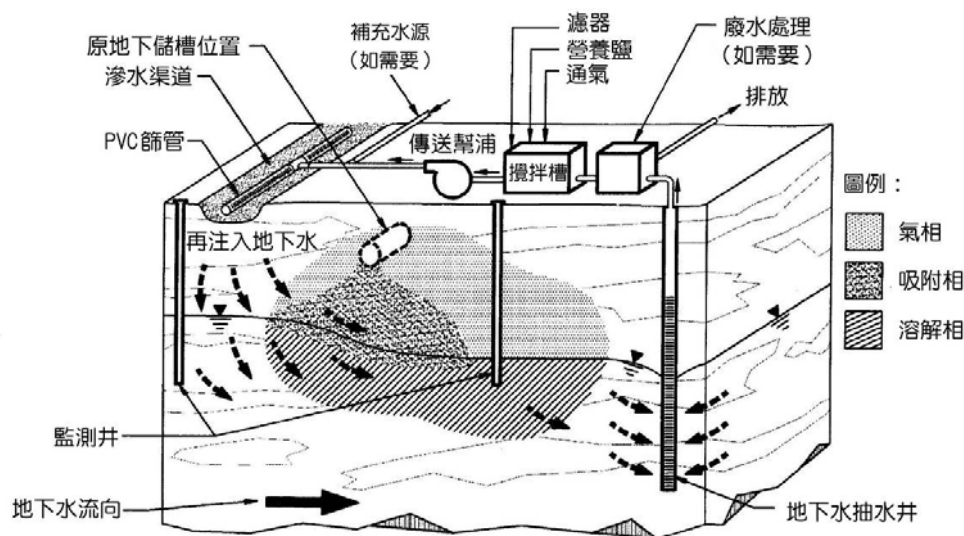
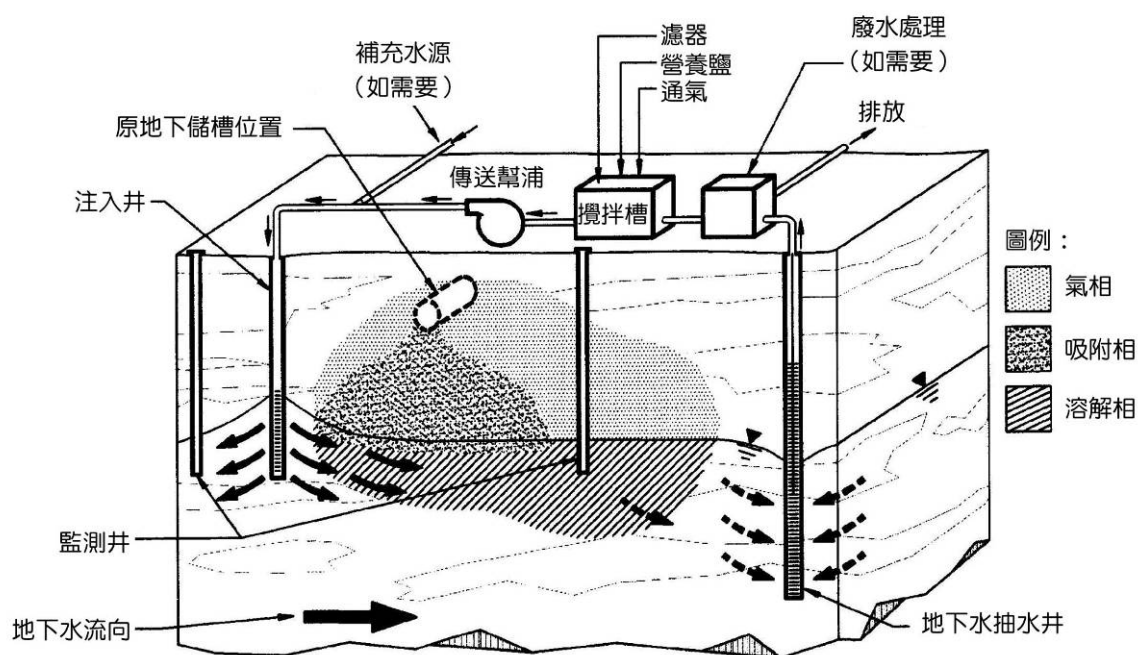


圖 5-24 採滲水渠道之現地地下水生物整治法示意圖^[39]

圖 5-252 採注入井之現地地下水生物整治法示意圖^[39]表 5-121 現地地下水生物整治法優缺點彙整表^[39]

優點	缺點
• 可處理飽和層中，被吸附在土壤上或堵塞在土壤縫隙間之地下水污染物。 • 使用者易取得設備，整治設備設置安裝容易。 • 對場址現行運作干擾最小。 • 相較於其他地下水污染整治技術(如抽出處理法)，所需整治時間較短。 • 在一般認知上，整治費用較其他整治技術(如抽出處理法、挖除處理)少。 • 可配合其他整治技術(如生物注氣法、土壤氣體抽除法)加速場址整治。 • 在許多案例中，此一技術不產生需進一步處理與處置的衍生廢棄物。	• 因微生物的成長與礦化沉澱作用，而使注入井或滲水渠道產生阻塞現象。 • 高濃度(TPH > 50,000 ppm)之低溶解性污染物可能對微生物產生毒性。 • 不易應用於低滲透性含水層中。 • 受污染地下水可能無法回注於地下水體。 • 可能需要持續性的監測與維護。 • 整治可能僅發生於較易滲透的含水層或通道中。

二、應用

一般現地地下水生物整治之程序是將地下水抽出，並於補充氧氣與營養鹽後，再行注入地下水體中，經由地下水循環過程補充之氧氣與營

養鹽，流過受污染區，並與污染區內的污染物與微生物產生充分混合與接觸，該等物質與微生物接觸後，應能促進污染區內微生物對污染物的生物降解作用。一般注入氧氣的方式包括空氣(或氧氣)注入法、過氧化氫稀釋液注入法或釋氧劑注入法等，其中，釋氧劑注入法較常用之釋氧劑如二氧化鎂(MgO_2)，而較常使用的方式是過氧化氫稀釋液注入法。

共代謝生物整治方法可處理含氯有機物，惟其應用案例較少，且須補充微生物成長所需之主要基質(substrate)，以促進生物降解作用，亦有注入氫氣或釋氫劑(hydrogen release compound, HRC)刺激共代謝作用之整治案例，釋氫劑係以乳酸(lactic acid)聚合物為主要成分之物質。

採用生物補強(bioaugmentation)方法進行現地地下水整治的案例不多，生物補強方法係選擇非污染場址土壤之固有微生物，將其注入地下環境中，以降解特定有機物的生物整治方法。

三、處理成效

一般現地地下水生物處理法主要以處理不含鹵素原子之揮發性有機物、半揮發性有機物與石油碳氫化合物為主，這些污染物可立即直接被微生物代謝掉，且僅需注入氧氣即可刺激生物降解，但受苯、甲苯、乙苯、二甲苯(BTEX)污染之地下水，則需注入硝酸鹽刺激生物降解。

共代謝生物處理則主要在處理含氯揮發性有機物或半揮發性有機物，例如處理含氯溶劑三氯乙烯(TCE)，其所需注入的基質如甲烷、丙烷或甲苯等。在一般厭氧狀況下，含氯原子愈多的有機化合物，其生物降解作用效果愈好，因此，生物降解過程中，經常會產生並累積含氯原子較少的二氯乙烯與氯乙烯。

四、技術限制

污染場址應用現地地下水生物整治法之限制因素包括：

- (一) 高污染濃度污染物可能對微生物造成毒性。
- (二) 具異質地質之污染場址中，不易將過氧化氫或硝酸鹽溶液注入整個受污染區內，高滲透性地質區因流速較快，較易先被整治完成。
- (三) 使用過氧化氫應注意安全與採取必要之預防措施。
- (四) 在地下水中，過氧化氫濃度大於 100 至 200 ppm 將抑制微生物的活動。
- (五) 地下水中之生物酵素(microbial enzyme)和高鐵離子濃度會迅速與過

氧化氫的反應，而減少過氧化氫與降低有效整治範圍。

(六) 現地地下水生物整治法應建立地下水循環系統，使污染物無法流出微生物進行生物降解之區域。

(七) 硝酸鹽氮為我國地下水污染管制標準之一般項目，環保機關可能禁止注入地下水體中。

(八) 可能需設置地面廢水處理系統(如氣提或活性碳吸附)，以處理抽取出來的受污染地下水。

(九) 無法應用於重金屬污染場址，重金屬可能對微生物具有毒性。

5.3 適用同時整治土壤與地下水污染之整治技術

5.3.1 電動力法

在污染場址的物理、化學或生物整治技術中，電動力整治技術為一種新穎的現地整治技術，可直接於污染場址現地將污染物加以移除、處理或侷限。一般而言，電動力法具有以下之優點：(1)能於現地將污染物由污染介質中去除；(2)不受污染物種類限制；(3)可有效控制電滲透流之流向；(4)高移除效率及具安全性；(5)對於低滲透性之土壤其處理效果亦十分顯著^[40]；(6)具有與其他整治技術搭配之彈性。在過去十餘年來，電動力法持續地吸引了研究人員及政府官員的注意，並嘗試將此種技術應用於污染場址整治方面，先前多應用於低滲透性土壤重金屬污染物之移除，後續又有用於有機污染物之去除，或搭配其他技術將污染土壤中有害物質去除^[41-47]。由於電動力技術操作毋需大規模開挖，適用於無機或有機污染物種，且無生物毒害之問題，在國外已有許多應用成功的案例，以下即針對其理論基礎及操作條件等逐一介紹，以提供未來現地應用之參考。

一、技術介紹

電動力法的原理係將正負電極置於待處理之污染場址中，施加適當大小之直流電壓或電流後，藉由陰、陽電極間生成之電場作用，驅使帶正電荷之離子被吸引到負極（陰極）；相反地，帶負電荷之離子則向正極（陽極）移動；此外，實驗證實溶解性非離子物種另可藉由電滲透流之傳輸，藉以引導土壤中電解質溶液之移動，進而達到去除土壤中污染物的目的，其原理示意圖如圖 5-26 所示^[48]。

電動力技術不僅適用於飽和層土壤，亦可應用於未飽和層土壤，其中，污染物質之傳輸方向與量，則受污染物濃度、污染離子移動性、土

壤結構與性質及土壤孔隙水界面化學與傳導性所影響。電動力整治技術的主要作用機制包括：(1)電滲透、(2)外在水力梯度、(3)酸鋒(acid front)趨向陰極處之擴散及陰、陽離子向其相反電性電極移動所造成之平流(advection)作用、以及(4)電動力操作過程中，在電極鄰近的電解反應等，但通常必須考量的兩個範疇則是：電動力傳輸—包括電滲透、電遷移與電泳等3種主要之傳輸機制，以及土體中誘發之電化學反應^[49]。此外，利用電動力技術將污染物藉由前述之作用向電極遷移後，可再利用電析、沉降或共沉降、離子交換樹脂或近電極處抽水等方式將污染物種予以去除。

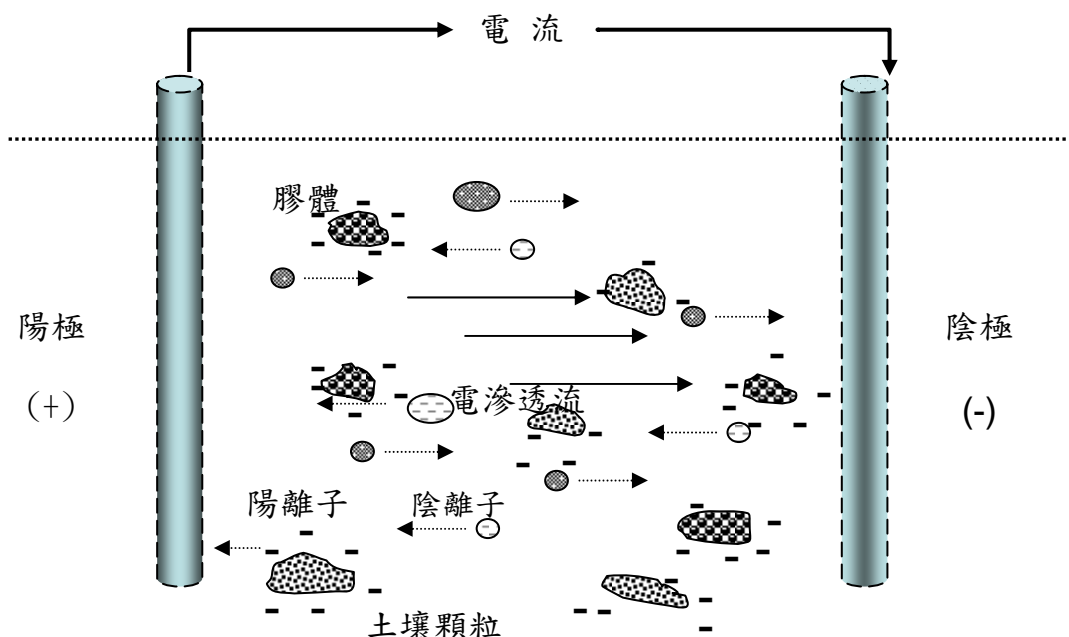
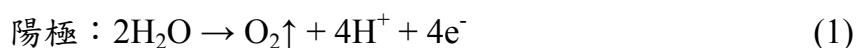


圖 5-26 電動力法處理原理示意圖^[48]

(一) 電解反應：電動力法進行時，陽極槽產生氧化反應，以致大量氫離子之持續累積，使得 pH 值將降至 2 左右(式 1)，而陰極槽產生還原反應，大量之氫氧離子而使 pH 值升至 12 左右(式 2)。陽極端產生之氫離子，會隨電滲透流向，往陰極移動。因酸性溶液之流動，將逐漸降低土壤之緩衝能力，有改變污染物在土壤中分布關係之可能。處理後污染物將隨電滲透流匯集於電極端，可抽取去除之或藉其他方法處理(如生物分解)。



(二) 電滲透流率：土壤顆粒之土壤之物化特性、操作流質、電壓等因素

為影響電滲透處理的重要因子。電滲透流率 Q_e (mL/d)，可以式 3 表示：

$$Q_e = \frac{\zeta \epsilon q}{4 \eta L} \cdot \frac{E}{L} \cdot A \quad (3)$$

式中， L =土壤管柱長(length of soil core，cm)；

A =截面積(cross-section area， cm^2)；

E =電位差(potential difference，Volt)；

ζ =界達電位(zeta potential，mV)；

η =流體黏滯係數(viscosity of fluid)；

ϵ =流體介電常數(dielectric constant of fluid)；

q =經驗常數(與土壤特性有關)。

而電滲透流率 Q_e 又可修正成類似達西公式：

$$Q_e = K_e \cdot i_e \cdot A \quad (4)$$

上式， K_e =電滲透係數(EO permeability， $\text{cm}^2/\text{V-s}$)，一般而言，介於 10^{-5} 至 $10^{-6} \text{ cm}^2/\text{V-s}$ 之間，高 K_e 值顯示高含水量。

i_e =電位梯度(potential gradient，V/cm)。

(三) 質量傳輸：應考慮污染物受擴散、離子移動，電滲透流動，水流動向，液固相間之反應(諸如吸附、溶解、氧化還原反應)等影響如 5 式所示：

$$J_i = D_i^* \nabla(-C_i) + \left(\frac{|Z_i|}{Z_i} \right) C_i \mu^* \nabla(-V) + C_i k_e \nabla(-V) + C_i K_h \nabla(-h) + \frac{1-\phi}{\phi} \frac{\partial(\rho_s c_{is})}{\partial t} \pm k_i C_i \quad (5)$$

$$\text{式中，} \quad \mu^* = \frac{D^* z F}{RT} ; \quad D^* = D \cdot \tau \cdot \phi ;$$

C_i = 某 i 物質濃度(mg/cm^3)，

t = 時間(sec)；

V = 孔隙流速(interstitial velocity， cm/sec)；

r = 固體密度(g/cm^3)；

C_{is} = i 物質在固體中濃度(mg/cm^3)；

k = 化學降解速率($1/\text{sec}$)； T = 絕對溫度($^{\circ}\text{K}$)；

f = 孔隙度(porosity)； t = 迴流係數(tortuosity factor)；

R = 氣體常數($1.987 \text{ cal}/^{\circ}\text{K}\cdot\text{mole}$)；

K_h = 水力傳導係數(hydrodynamic conductivity, cm/sec)，

m^* = 有效離子移動係數(effective ion mobility)，

D^* = 有效擴散係數(effective diffusion coefficient, cm^2/sec)，

D = 自由溶液中離子擴散係數(diffusion coefficient of ion in free solution, cm^2/sec)，

因此在電動力處理過程中，控制質量傳輸之重要土壤因子，如土壤 pH 值，土壤界達電位(表面電荷)，土壤粒徑，土壤中污染物的含量，土壤對污染物吸附特性，及控制操作流質之成分、電壓、電極槽之 pH 值應列入考慮並加以分析^[46]。

經由電極對建立化學電場後，產生若干反應，主要可分為兩部分：(1)因施加電位而發生的反應，例如：電滲透(electroosmotic flow)、離子遷移(ionic migration)、水的電解(electrolysis of water)、電泳(electrophoresis)、在陰極的電沉積反應(electrodeposition at the cathode)；(2)不論是否施加電位均會發生的反應，例如：吸附/脫附(sorption / desorption)、錯合/沉澱(complexation / precipitation)、酸鹼反應(acid-base reactions)、擴散(diffusion)^[49,50]。在現地復育應用上，電動力法除可適用於各種污染土壤外，對於低滲透性之土壤(例如：淤泥及黏土等)尤具優勢；此外，適用之污染種類相當廣泛，包括：重金屬、有機污染物、輻射核種及具毒性陰離子等，此整治技術可同時處理飽和層及未飽和層土壤，其處理費用亦較一般傳統技術為低。除此之外，電動力技術亦具有水文控制功能及可與其他整治方法組合之特性。

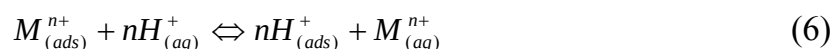
二、電動力法去除機制

電動力法造成土壤中污染物之去除機制有以下 4 種：離子遷移：為離子於孔隙間移動；電滲透流：環境介質中流體之移動，施加電壓時水分子之移動；電泳：為帶電顆粒之移動，包括膠體或微胞；電解：電場所造成水分子分解之化學反應等，土壤系統(包括：土壤顆粒、孔隙流體

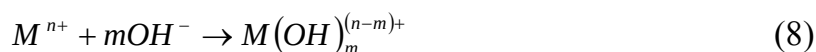
及空氣)在電場作用下，帶電荷離子向其相反電性的電極移動，在離子移動的同時拖曳水分子移動，藉此引導孔隙流體的移動，而形成電滲透流[51]。

一般而言，在水-土壤系統中，土壤顆粒表面通常帶負電荷，因此，電滲透流的流動方向為由陽極向陰極流動。造成電滲透流現象主要係由於水具有很高的介電常數(dielectric constant)及容易與其他離子形成水合離子(hydrated ion)的特性，一個陽離子可以和數個水分子帶負電的一端連結形成穩定的排列，至於陰離子的水合作用並不明顯，因此，陽離子往陰極移動的同時也使得水分子往陰極移動。電動力法之化學反應完整程序如下敘述^[52]：

- (一) 陽極表面進行氧化反應，產生氫離子(H^+)
- (二) 陰極表面進行還原反應，產生氫氧離子(OH^-)：
- (三) 陽極產生的氫離子藉由離子遷移(ion migration)效應、電滲透效應、水力坡降及濃度擴散(concentration diffusion)的作用下，循著孔隙往陰極流動。
- (四) 氫離子在往陰極輸送時，移動的過程中，會不斷地與土壤所吸附的陽離子污染物進行離子交換反應：



- (五) 土壤中的孔隙流體因電滲透、水頭及濃度擴散而往陰極流動，故重金屬因孔隙流體的流動而被帶出土壤，達到淨化土壤的目的。
- (六) 陰極除了電解水反應外，亦會發生勻相與非勻相兩種反應。其中勻相反應包含了 H^+ 與 OH^- 中和反應與重金屬離子的錯合反應：



非勻相反應包含重金屬離子的沉澱反應與還原反應：



事實上，這些反應對整個處理程序具有關鍵性的影響。例如，沉澱反應所形成的固體顆粒也許會累積在土壤孔隙中，直至填滿整個通道而造成堵塞。

三、電動力法之影響因子

影響電動力技術之污染物移除因子主要包括：鄰近電極之化學反應、土壤含水率或飽和度、土壤組成、pH 值及其梯度、污染物種類與濃度及施加之電流密度等。

(一) 鄰近電極之化學反應

於電動力進行時，鄰近電極處所產生極化現象，將造成能量傳輸的障礙，因而降低污染物移除之效率。極化現象包括：活性極化(activation polarization)、濃度極化(concentration polarization)及歐姆極化(ohmic polarization)等^[53,54]。活性極化主要來源為電極反應期間，由於中間物的產生，或電極上因產生氣體而吸附於電極上，影響電極的電位差而使電極的反應速率變慢，造成電極之電阻增加。濃度極化則為電動力技術操作時，兩電極處的電解質濃度與最初平衡值不同，形成一濃度梯度而致電極之電位改變之現象。另外，當電極表面附有一層雜質（例如金屬電極之氧化物、不溶性鹽類、油脂或其他金屬等）時，會造成電極之電阻增加，此現象稱為電阻極化或歐姆極化。上述 3 種極化現象為電動力操作過程電流密度降低之可能原因。

(二) 土壤含水率

土壤之含水率之多寡將影響電動力法對於污染物種移除之成效，為保持合適之操作狀態，有人會在陽極處連續地注入清潔劑或清水，以確保污染物得持續由陰極處移出^[53]。

(三) 土壤型態與結構

由於土壤不同物化特性之影響，將使其整治成效受到影響，例如 pH 值之變化、水解及氧化/還原反應等。Krishna 等人^[55]曾針對 3 種不同型態的土壤進行電動力實驗，結果發現，當土壤的碳酸鹽含量較高時，會阻礙酸鋒的形成，因此，處理過程中土體呈鹼性；而當土壤的碳酸鹽含量較低時，明顯地會有酸鋒的形成，且土壤由陽極處至陰極處產生 pH 值變化梯度。因此，若土壤的碳酸鹽含量較低，將有助於陽離子於土壤表面脫附並隨電滲透流移出土體。此外，Vane 與 Zang^[48]亦曾針對高嶺土與皂土等不同種類之黏土進行土壤顆粒界達電位對於電滲透流率影響之探討，結果發現黏土於 pH=5 時電滲透流為 pH=3 時之 3 倍，若能選擇適當的電解液條件

（例如：較低之離子強度、較高之 pH 值及較低之二價陽離子濃度等）將有助於電滲透流的增加。

(四) pH 值及其梯度

當水電解反應所生成之 H^+ 離子與 OH^- 離子未被移除或中和時，將顯著影響土體之界達電位、物種溶解度、離子狀態與電荷數及污染物種之吸附等。此外，在低 pH 值狀態下，將有助於金屬性污染物種之脫附，並形成可溶性之化合物，增進其移除效果。Lee 與 Yang^[56] 曾利用電解液迴流方式控制處理液之 pH 值，進行電動力整治受鉛污染之高嶺土試驗，藉此避免電滲透流之降低與重金屬之沉積。試驗結果顯示於迴流過程中，黏土 pH 值之降低速率明顯減緩，以 1.1 L/min 迴流速率可將陽極槽液 pH 值由 2 增加至 4、陰極槽液 pH 值由 12 降至 8。此外，陰極槽液中之鉛明顯地鍍於電極表面，並未沉積、吸附或進入測試的黏土中。然而，當 pH 值過低將致使界達電位極性之改變，而使電滲透流改向。為增進污染物種之移除成效，如何控制合適之 pH 值是電動力法成功應用的重要因素。

(五) 污染物種類與濃度

電動力法對於高溶解性無機離子物種之移除尤具成效，即使是低滲透性土壤仍具效果；對於不溶解性或非離子性之有機物種，則可利用其電化學反應機制或其他改善技術（例如界面活性劑之添加）達到整治成效。電動力技術對於高濃度污染物之整治，通常需要較長之操作時間。此外，不同之金屬初始濃度與土壤吸附容量，將使得土壤表面之負電荷降低，並於 pH 值達零電位點時，轉變為帶正電，相同地，陰離子之化學吸附將使土壤顆粒表面負電荷增加。另外，文獻中曾針對土壤中離子物種對電動力影響效應進行研究^[57]，發現當土壤中 Al^{3+} 含量較高時， Al^{3+} 遷移至陰極時受到高 pH 值環境的影響會形成停滯，直至被 H^+ 再度溶解，此結果並造成土體前段部分擴散現象及電泳效應的不明顯與電位梯度平緩，而於土體中後段部分擴散現象及電泳效應則明顯劇降，電位梯度變得明顯。

(六) 施加之電流密度

Hamed 等人^[58] 以不同電流密度針對高嶺土探討電滲透流流率，在經由施加 0.123 mA/cm^2 至 0.615 mA/cm^2 等不同電流密度的結果發現，施加的電流密度愈大，其電滲透流流率愈大，並可減短

達到預定的電滲透流流率之時間，及縮短酸鋒由陽極至陰極所需的時間。

四、電動力法之應用

電動力法已被美國環保署列為整治 DNAPLs 污染黏質土壤場址之可行性技術之一^[50,59]，且已經成為商業化的整治技術；於國外研究方面，電動力法用於處理現地受污染土壤之場址且效果顯著，表 5-13 為美國電動力現地處理受重金屬污染土壤之案例及研究^[60]，其處理污染物大多為重金屬污染土壤，然經電動力處理後之去除率可達 35-100%。國內雖仍在起步階段，但對於污染場址現地復育，或實驗室規模試驗電動力參數之探討，皆有相當多之研究，主要處理之污染物為鎳、銅、鋅、鉛、鎘及鉻等，其操作條件彙整如表 5-14。

表 5-13 美國電動力現地整治及實場研究^[60]

研究單位	土壤特性	電極間距	電極埋入深度	電壓 / 電流大小	操作流質	污染場址規模	污染物	處理時間	處理前、後污染物濃度	處理費用
Electrokinetics, Inc. (EK)-CADEX™ Electrode System	高嶺土	N/A	3 呎	N/A	特殊試劑	長 60 呎、寬 30 呎、深 3 呎	鉛	6-8 個月	處理前 1000-5000 ppm 處理後 N/A	N/A
Environmental & Technology Services (ETS)	黏土	N/A	N/A	10-15 A	N/A	長 200 呎、寬 200 呎、深 70 呎	VOCs BTEX TPH	3-12 個月	處理前 VOC：10-30 ppm BTEX： 3000 ppm 處理後 VOC：<0.1 ppm BTEX：< 40 ppm TPH：<35 ppm	\$17-50/噸
Isotron Corporation-ELECTROSO RB™ Process	砂及高嶺土混合	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	鈾、汞	N/A	處理前 汞：10-20 ppm 處理後 鈾：50% -90% 移除	N/A
Consortium of Monsanto, DuPont and General Electrics-Lasagna™ Process	含礫石及砂土層之黏土	2-7呎	15 呎	100-140 40-45 A	V N/A	長 15 呎、寬 10 呎、深 15 呎	TCE	4-36 個月	處理前 1 ppm-1760 ppm 處理後 <1.5 ppm	\$40-90/英畝
Geokinetics International, Inc. (GII)—Pool Process	黏土	5-10 呎	0.3-3.3 呎	5-20 V 0.5-1.0 A	酸、鹼	長 23 呎、寬 10 呎、深 3.3 呎	鎘、銅、 鎳、鉛、 鋅	2-18 個月	處理前 (ppm) 鎘：600 銅：500-1000 鎳：860 鉛：300-5000 鋅：2600 處理後 (ppm) 鎘：<50 銅：<250 鎳：<80 鉛：<75 鋅：<300	
Isotron Corporation—SEECTM Pad Technology and ELECTROSORBTM Process	高嶺土、砂	4-5呎	2 呎	90-100 V 40-50 A	檸檬酸、碳酸鹽	長9呎、寬8呎、深2呎	鈾、汞	20-40 天	處理前 鈾：600 ppm 處理後 鈾：>99% 移除	N/A
Lynntech, Inc.	黏土	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	鉻、鉛、 鹵化物	3-9 個月	處理前 N/A 處理後 鉛：65% 移除	\$65 -125/英畝

表 5-13 美國電動力現地整治及實場研究^[60] (續 1)

研究單位	土壤特性	電極間距	電極埋入深度	電壓 / 電流大小	操作流質	污染場址規模	污染物	處理時間	處理前、後污染物濃度	處理費用
Sandia National Laboratories (SNL)	飽和度25%之未飽和土壤	N/A	15 呎	N/A	氯化鈉	700-1000 立方呎、深 15 呎	鈾、鉻	4-12 個月	處理前 鉻：25-10000 ppm 處理後 鉻：75% -90% 移除	\$50-150/噸
Geokinetics International, Inc. (GII)—Pool Process	黏土	5-10呎	0.3-3.3 呎	5-20 V 0.5-1.0 A	酸、鹼	長 230 呎、寬 10 呎、深 3.3 呎	鎘、銅、鎳、鉛、鋅	2-18 個月	處理前 鎘：600 ppm 銅：500-1000 ppm 鎳：860 ppm 鉛：300-5000 ppm 鋅：2600 ppm 處理後 鎘：<50 ppm 銅：<250 ppm 鎳：<80 ppm 鉛：<75 ppm 鋅：<300 ppm	N/A
Massachusetts Institute of Technology (MIT)	高嶺土	20 公分	1.5 公分	20 V	醋酸	實驗室土壤管柱，長 200 mm 直徑 32 mm	鋅、酚	9-60 天	處理前 鋅：500 ppm 酚：45-450 ppm 處理後 鋅：98% 移除 酚：94% 移除	\$20-30/噸
Electro-Petroleum, Inc. and Lehigh University	高嶺土砂、黏土	N/A	N/A	30 V 1.5 A	EDA、去離子水	實驗室管柱；長 7.62 公分、深 3.55 公分	鈾、鋇、鉍、鉻、鈷、鎘、汞、鉛、鎳、鋅、碳氫化合物	24-170 小時	處理前 鈾：10-100 ppm 鋇、鉍：1000 ppm 鉻：3000 ppm 汞：5-130 ppm 鎳：1000 ppm 鉛：15000 ppm 鋅：22500 ppm 處理後 鈾：30-80% 移除 鋇、鉍：70-100% 移除 鉻、鎳：94-95% 移除 汞、鉛：60-85% 移除 鋅：35-65% 移除	\$37.5/英畝

表 5-14 國內電動力法處理重金屬污染土壤之相關研究

作者	操作流質	研究內容	污染物	操作條件
洪肇嘉等人 (1998a) ^[61]	陽離子萃取液為 1M 氯化鎂， 陰離子萃取液為 0.5M 的磷酸氫二鈉	電動法復育鉻、鎘、鉛污染土壤之研究	鉻、鎘、鉛	1. 電位坡降為 1 V/cm，處理時間為 5 天 2. 土壤種類 (石英砂及高嶺土) 3. 電極材質 (惰性石墨電極及不鏽鋼網電極) 4. 污染物種類：陽離子(鎘及鉛)及陰離子(六價鉻)
洪肇嘉等人 (1998b) ^[62]	2.5mM 之重鉻酸鉀及 三價鉻、鉛、鎘等硝酸 鹽類	電動法附加水流去除鎘、鉻、鉛污染土 壤之研究	鉻、鎘、鉛	1. 電位坡降為 1 V/cm 2. 改變電極方向 3. 污染物種類 (鉻、鎘、鉛) 4. 流速 (1.0×10^{-3} 及 1.0×10^{-4}) 5. 溫度 (15 °C 及 30 °C)
洪肇嘉、紀吉鴻 (1999) ^[63]	去離子水	重金屬處理污染土壤之二維尺度研究	鎘	1. 電場強度 10.5V 2. 靜止系統及流動系統 (流動水流，外圍補注及中間抽取)
張坤森(1998) ^[64]	去離子水	發展改良式電動力學技術整治鎘污染 土壤之研究	鎘	1. 電壓 (25 V、50 V、100 V、200 V) 2. 土壤種類 (砂、高嶺土、蒙脫土)
張坤森等人 (1999) ^[65]	去離子水	以改良式電動力技術整治桃園縣鎘、鉛 污染土壤之研究	鎘、鉛	1. 定電壓 200 V 2. 添加 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 、電解酸液、超音波」之前處理
張坤森等人 (2000) ^[66]	去離子水	利用超音波及電動力技術促進鎘、鉛污 染土壤整治之研究	鎘、鉛	1. 土壤種類 (砂土、高嶺土、蒙脫土、觀音土及蘆竹土) 2. 超音波震盪時間 5~30 min 3. 定電壓 (50 V 及 100 V)
張坤森等人 (2001) ^[67]	HCl、citric acid、電解 酸液、EDTA、SDS 及 去離子水	觀音及蘆竹鎘、鉛污染土壤之整合式復 育技術研究	鎘、鉛	1. 定電壓 100 V 2. 萃取液：HCl、citric acid、電解酸液、EDTA、SDS 及去離子 水
張坤森、劉世樑 (2004) ^[68]	地下水	表面處理業重金屬污泥之電動力整治 技術及成效評估研究	重金屬	1. 二階段定電壓：初期 10 V (第 1-4 天)、中後期 40 V (第 5-11 天) 2. 處理時間為 11 天
黃嘉貞、薩支高 (2000) ^[69]	去離子水	以電動法復育受鎘污染土壤之模場 2D 試驗	鎘	1. 定電壓 32 V 2. 通電時間分別為 1~30 天
林世平等人 (2004) ^[70]	地下水	改良電壓操作方式對電動力處理受污 染底泥之影響	底泥	1. 定電壓分別為 16.0 及 24.0V 2. 處理時間為 48 及 96 hr
章日行等人 (2004) ^[71]	不同 EDTA 之鈉鹽溶 液	循環改良式電動力法復育鎘與鉛污染 之土壤	鎘、鉛	1. 操作流質：不同 EDTA 之鈉鹽 2. 定 pH 值、導電度及電流 3. 處理時間為 21 天

5.3.2 植生復育法

植生復育(phytoremediation)係利用植物以達到移除、濃縮及溶解環境污染物，因此所有受植物影響且有助於污染物清除之生物、化學、物理程序均可稱為植生復育^[72]。植物本身進行多種新陳代謝反應，亦具有相當顯著之吸附容量，及與土壤間具有離子選擇性之傳輸系統，因此其可調整適應於環境中重金屬及有機污染物之存在，植物根部組織由於提供大量之比表面積，故對土壤中污染物之汲取多由此區域開始，因此植物可藉由根部降解有機污染物及減緩其移動，亦可將重金屬由土壤中濃縮至植物莖、葉部而達到去除污染物之目的。植生復育處理機制如圖 5-27 所示，其除污物理程序主要包含：

- 控制水力坡降，減低地下水流速，減少污染物之擴散速率。
- 加速有機物降解或伴隨根層微生物的作用而促進降解。
- 使無機污染物能在植物部分達到濃縮的目的。
- 本身污染物與植物的組織達到吸附的情形。
- 有機污染物將自根層吸附後至葉部揮發，而擴散至大氣。

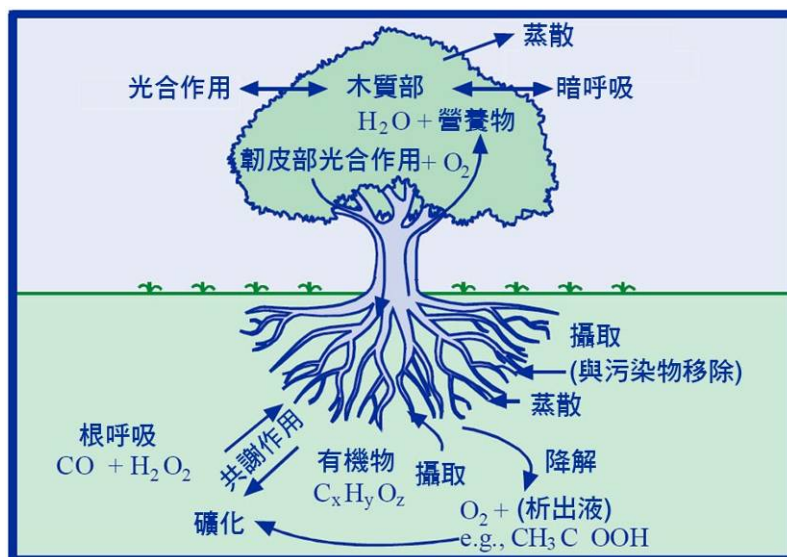


圖 5-27 植生復育處理機制^[73]

一、技術介紹

植物與微生物共生的關係可以想像成生物反應器一個自然平衡的機制，而此平衡機制控制微生物降解地下污染物的所需環境條件及物質，當提供太陽能、二氧化碳、水、無機營養物質，植物本身提供很多

在生物分解工程上所需之條件而達到去除污染物，而其僅需極低花費^[74]。選擇植生復育物種所需的條件包含下列：根部的成長速率及範圍、蒸散速率、適應污染物的能力、植物在整治場址中得以生長適宜的能力。植生復育技術概述整理如表 5-15 所示，依據其不同之應用性可區分為植物萃取(phytoextraction)、植物穩定(phytostabilization)及根層過濾(rhizofiltration)等 3 類，植物選擇之指標包括：

- (一) 生長速率及產量
- (二) 蒸散能力
- (三) 具降解功能酵素之產生
- (四) 根部區域生長深度
- (五) 對污染物之容忍力
- (六) 生物累積能力

表 5-15 植生復育技術概述^[75]

技術特性 ● 適用受重金屬污染且適合栽種植物之場址。 ● 處理深度僅至植物根部區域。 ● 所需時間較其他整治技術為長。 ● 植物品種適用性隨著污染物種而異。		
植物萃取 (phytoextraction)	植物穩定 (phytostabilization)	根層過濾 (rhizofiltration)
<u>定義</u> ：將污染物由土壤汲取至根部及地表上之植物組織，而此植物組織將定期收割再進行後續處理。	<u>定義</u> ：利用根部滲出液化學物質，減低污染物之流動性，使污染物之化學物質固著於土壤與根部界面；提高土壤酸鹼值可助於重金屬污染物穩定化。	<u>定義</u> ：根層過濾主要是利用植物根部對於重金屬進行吸附、濃縮、及沉澱以處理受污染水。
<u>技術應用現況</u> ：烏克蘭已針對核反應金屬污染場址採用此技術進行實場實驗；美國紐澤西州及俄亥俄州亦進入實場實驗階段。	<u>技術應用現況</u> ：研究正進行中。	<u>技術應用現況</u> ：已普遍應用於人工溼地處理受污染水。
<u>應用性</u> ：研究發現鎳及鋅為最容易被植物汲取；而銅及鎘之初步研究結果亦顯示處理效率頗佳。	<u>應用性</u> ：重金屬應用範圍廣泛，尤其對鉛、鉻及汞最為有效。	<u>應用性</u> ：其對於處理大量且低濃度重金屬之廢水，非常具經濟效益，處理重金屬種類廣泛。
<u>備註</u> ：處理經費依污染濃度、污染深度、植栽數量及後續處理費用而定。	<u>備註</u> ：場址需進行長期維護工作。	<u>備註</u> ：僅可適用於地下水及廢水之處理。

(一) 植物萃取

植物萃取技術係使用高累積植物(hyperaccumulator plant)將土壤中金屬濃縮至根部及地表上之植物組織^[72,76,77]，所謂之高累積植物定義為葉部含有 0.01% (乾基)以上之鎘，0.1% (乾基)以上之鎳、鈷、銅、鉻，或 1% (乾基)以上之鋅、錳之物種，而與金屬污染濃度無關^[76,78]。高累積植物之生長受到地域環境之影響^[76,78]，文獻顯示，在新英格蘭、菲律賓、古巴、巴西發現適合處理鎳之高累積植物，在歐洲及亞洲發現處理鎳及鋅之高累積植物，植物物種及對應污染物彙整如表 5-16 所示。

由於高累積植物具有生物質量高產率特性，因此當其達到萃取土壤重金屬之目的後，此濃縮重金屬之植物組織需經過完善處理，才不致對環境造成危害，同時亦應注意落葉之處理，以免重金屬經由落葉與土壤之接觸，又回到土壤傳輸途徑。

表 5-16 高累積植物物種^[76,78]

重金屬	植物物種	葉部重金屬含量(%，乾基)	生長國別
鈷	<i>Haumaniastrum robertii</i> (蒿莽草屬)	1	薩伊
銅	<i>Aerolanthus biformifolius</i>	1	歐洲
鎳	<i>Phyllanthus seroentinus</i> (葉下珠屬)	3.8	新英格蘭
	<i>Alyssum bertoloni</i> (亭薺類植物) and 50 other species of alyssum	> 3	歐洲南部及土耳其
	<i>Sebertia acuminata</i>	25	新英格蘭
	<i>Stackhousia tryonii</i>	4.1	澳洲
鉛	<i>Brassuca juncea</i>	< 3.5	印度
鋅	<i>Thlaspi calaminare</i> (蘆葦葉薺屬)	< 3	德國
	<i>Viola species</i> (堇菜屬)	1	歐洲

(二) 植物穩定

植物穩定係利用植物限制土壤中金屬的移動性及生物利用性。理想上而言，具備植物穩定功能之整治植物應該能容忍高濃度之重金屬，且藉由吸附、沉澱、複合作用或改變金屬價數而使減低其在土壤中之移動性。同時該類植物之組織亦應具備有對重金屬低

濃縮之特性，如此可防止重金屬累積於莖、葉部，而成為有害性的廢棄物。此外，該類植物除可以將重金屬穩定存在土壤外，其實可以減少土壤的沖蝕及底土的移動。研究顯示，白楊樹(*Popolar*)是植物穩定功能最好的深根性植物，其根部可以達到土壤下數公尺的範圍，能將重金屬穩定於土壤部分，當其他整治技術不具經濟效益時，植物穩定技術可以列為重要替代處理技術選項之一。在英國被發現許多植物可以達到植物穩定的功能，例如：

1. *Agrostis tenuis*,cv Parys：用於處理受銅污染之土壤。
2. *Agrosas tenuis*,cv Coginan：用於處理受鉛及鋅污染之酸性土壤。
3. *Festuca rubra*,cv Merlin：用於處理受鉛及鋅污染之鹼性土壤。

(三) 根層過濾

根層過濾主要是利用植物根部對於重金屬進行吸附、濃縮、及沉澱以處理受污染水。主要使用是陸生植物而非水生植物，因為陸生植物有長且纖細的根部系統，具備有大量的比表面積，可達到上述去除重金屬污染物的目的。根層過濾所移除重金屬的步驟中，並未包含任何生物程序，因此利用此作用來移除污染物的速率要比植物萃取來的低。利用根層過濾最被大家所熟悉例子為人工溼地的建造，其對於處理大量且低濃度重金屬廢水，非常具有經濟效益，已成功用於受污染水及滲出水的處理。

植物根部的析出物可能為有機物或無機物，根部析出物的碳成分來自於植物吸收二氧化碳，之後再以醣類型態存在，1-40%之光合作用產物都有可能從植物的根部釋放到土壤。根層析出物有機部分以許多形式存在，包括單醣、氨基酸、有機酸、酚類^[79]。植物析出物在現地整治扮演的功能尚未被研究出來。研究顯示，所扮演的角色可能為營養物、抗生素或化學反應的誘導者，植物的根部會藉由傳送氧氣或改變土壤的透水性來影響土壤氧化還原的能力，另外植物可以藉由蒸散系統及根部析出物持續釋出保水性的有機物質，可以改變土壤水體的水面關係。

二、性能及經濟分析

各項植生技術之優缺點分析彙整如表 5-17。以植物萃取為例，其處理效能可藉由比較污染物濃度、污染土量、植物生質產率、及植物累積重金屬容量而獲得，每單位面積所需去除污染物之植物生質量(W_b)及處

理年限(T)計算如下：

$$W_b = W_m / F \quad (11)$$

式中 W_b ：每單位面積所需去除污染物之植物生質量(公噸/英畝)；

W_m ：每單位面積之重金屬污染總量(公噸/英畝)

F ：累積因子，每單位重量之植物生質量所濃縮之重金屬量

$$T = W_b / R \quad (12)$$

式中 T ：處理年限(年)

R ：植物產率(公噸/英畝/年)

表 5-17 植生技術之優缺點分析^[73]

植生技術		優點	缺點
機制	植物		
植物萃取	樹木	高生質(biomass)產率	● 將污染物由地層轉移至地表 ● 重金屬累積於植物組織，需進行後續處理。
	草類	高累積性	● 低生質(biomass)產率及減緩生長速率 ● 重金屬累積於植物組織，需進行後續處理。
	農作物	高生質(biomass)產率及提升生長速率	● 當草食動物食用後，污染物將進入食物鏈而危及人類。 ● 重金屬累積於植物組織，需進行後續處理。
植物穩定		無後續污染植物處理問題	● 由於重金屬被圍堵於土壤局部區域，而並未移除，因此污染場址需進行長期監控及維護工作。
根層過濾		金屬去除效果佳	● 僅可處理水相污染物 ● 重金屬累積於植物組織，需進行後續處理。

利用植生復育技術的目的通常是降低有害場址整治的費用，此技術的整體經濟分析須包含植栽的植種、植栽收割及後續生長之植物生長所需處理之費用。植生技術通常與其他技術共同串聯使用，使得植生技術在整個經濟效益分析上也愈顯困難。其經濟分析項目可分為 12 類^[73]：

- (一) 場址整理費用(site preparation)
- (二) 法規許可證照費用(permitting and regulatory requirements)
- (三) 初設設備(capital equipment)
- (四) 啟動及固定費用(start-up and fixed costs)
- (五) 人事費(labor)
- (六) 消耗材料費用(consumables and supplies)
- (七) 水電費用(utilities)
- (八) 廢水處理及處置費用(effluent treatment and disposal)
- (九) 廢棄物運送及處置費用(residual waste shipping, handling, and disposal costs)
- (十) 分析費用(analytical services)
- (十一) 維修費用(maintenance and Modification)
- (十二) 封場費用(demobilization)

表 5-18 為以一 200,000 平方英尺受三氯乙烯(TCE)污染場址之經濟分析案例，以分析費用(37.1%)、人事費(23.2%)及法規許可證照費用(11.8%)所需費用最高。

表 5-18 植生技術經濟分析案例 (面積：200,000ft²；污染物：三氯乙烯)^[73]

類別	費用(美金，元)	總費用百分率(%)
(1)場址整理費用		
資料蒐集	2,500	
地層特性	5,000	
地下水井設置	24,000	
整地	3,700	
植栽	2,500	
灌溉系統設立	4,250	
其他	1,250	
小計	42,650	9.1%
(2)法規許可證照費用		
許可證	5,000	
報告	50,000	
小計	55,000	11.8%
(3)初設設備		
中央數據資料收集器 及其相關設備	4,900	
壓力轉換器(10 組)	18,000	
土壤水監測探針(18 組)	6,000	
植物滲出液量探針及 資料收集器	3,593	
小型氣象站	3,000	
地下水採樣設備	1,240	
小計	37,833	8.1%
(4)啟動及固定費用		
小計	3,783	0.8%
(5)人事費		
植栽維護人力	28,000	
監測及採樣人力	80,000	
小計	108,000	23.2%
(6)消耗材料費用		
灌溉系統材料	2,000	
肥料及土壤改良劑	3,000	
除草劑及農藥	2,000	
樹木(960 株)	480	
工具房	2,000	
其他	10,000	
小計	19,480	4.2%

表 5-18 植生技術經濟分析案例(續)(面積：200,000ft²；污染物：三氯乙烯)

類別	費用(美金，元)	總費用百分率(%)
(7)水電費用		
電力	12,000	
水費	900	
小計	12,900	2.8%
(8)廢水處理及處置費用		
小計	0	0.0%
(9)廢棄物運送及處置費用		
污染土處置	7,500	
小計	7,500	1.6%
(10)分析費用		
地層特性監測	38,445	
每年監測費用(10 年)	134,400	
小計	172,885	37.1%
(11)維修費用		
灌溉系統維修	1,000	
監測井之維修與更新	4,000	
小計	5,000	1.1%
(12)封場費用		
棄井作業(5 口)	1,050	
小計	1,050	0.2%
總計	466,051	

三、影響因素

假若整治場址中的污染物深度非常接近地表，且其擴散性不大，並且對人體的危害性極低，其實植生復育技術是非常具有潛力的整治技術。其影響整治復育效率的因子有二：

(一) 場址特性

植生復育技術的處理效率通常被限制在根部生長區域之表土附近，因此影響植生復育的最重要限制因子就是根部處於的深度，通常在地表下 20-100 公分，當然實際深度要依據植物及土壤之型態決定，所以最適合利用植生復育的污染場址必須是污染物位於表土附近。而土壤的種類，在於植物去除重金屬物質扮演著重要的角色，因此在選取植物之前，可能必須先做污染特性的調整，可能包

括土壤的 pH 值、營養成分、測試生物活性，如此才可更加瞭解此場址是否能執行植生復育的技術。當然除了土壤本身的特性外，尚有天候、灌溉水的頻率及是否加以施肥，也都影響到植物生長的情形，同時也影響到污染物去除的效率。

(二) 污染物特性

受重金屬低度及中度污染的場址最適合種植高累積性的植物。研究發現，最難被植物所吸收或穩定為鉛金屬，若將土壤特性進行調整，如降低 pH 值及減少磷酸鹽和硫酸鹽的含量，就可提升鉛金屬之處理效率^[79]。土壤特性將影響植物的生長情形，所以進行整治前，應先對當地的土壤特性及植栽先行測試，方可選取最適的處理條件。

四、未來研究方向

目前植生復育技術並未全面商業化使用，宜針對此技術在安全上、法規制度層面進行深入的探討，方能將植生復育技術建立為一個可行且標準化的整治復育技術，屆時此技術會成為具有經濟性、非侵害性、太陽能動力及具有現地處理特性之環境友善技術。根據 1994 年美國國防部「Summary Report of a Workshop on Phytoremediation Research Needs」報告指出，植生復育技術未來 3 個重要研究方向如下：

(一) 研究污染物之汲取、傳輸及累積之機制

有關於植生復育的研究於物理方面、生化方面及遺傳學的程序上應進行深入探討，因為這方面的研究將有助於更加瞭解重金屬於植物中的吸附及傳輸的機制，以便於我們可以選取最適合的植物來進行整治。

(二) 高累積性植物在遺傳學方面的評估

從遺傳學的角度及分子生物工程技術面，積極進行植物篩選技術的研究，以便培育適合的品種來進行污染場址的植生復育。

(三) 實場評估及有效性測試

應積極進行植生復育實場的整治，以便提供完善的技術資料，俾於建立實場技術操作標準手冊，以便讓許多研究學者及業者加以遵循。

5.3.3 生物漱洗法

一、技術介紹

生物漱洗法(bioslurping)主要在抽除自由相油品(浮油)，與兩相抽除法主要不同之處在抽除管之位置，生物漱洗法之漱洗管(slurper tube)設置在浮油界面上，如圖 5-28 所示，生物漱洗法維持浮油由水平方向往漱洗管移動，儘量避免產生洩降錐之現象。生物漱洗法利用置於地面上之真空抽氣幫浦，使污染物(如浮油)與地下水伴隨著抽除的氣體，經由漱洗管被抽取出來，含污染物的液體在氣液分離器中被分離出來；抽氣使抽水井內產生負壓，促使通氣層中的空氣流通，並藉由補充土壤中的氧氣，增強通氣層與毛緣層好氧微生物之生物降解作用。

土壤氣體抽除速率視漱洗管中液體回收的狀況而定，當自由相物質(浮油)回收工作完成，則生物漱洗系統可被轉換成傳統生物通氣系統，繼續進行通氣層土壤之整治。茲將生物漱洗法之優缺點彙整如表 5-19。

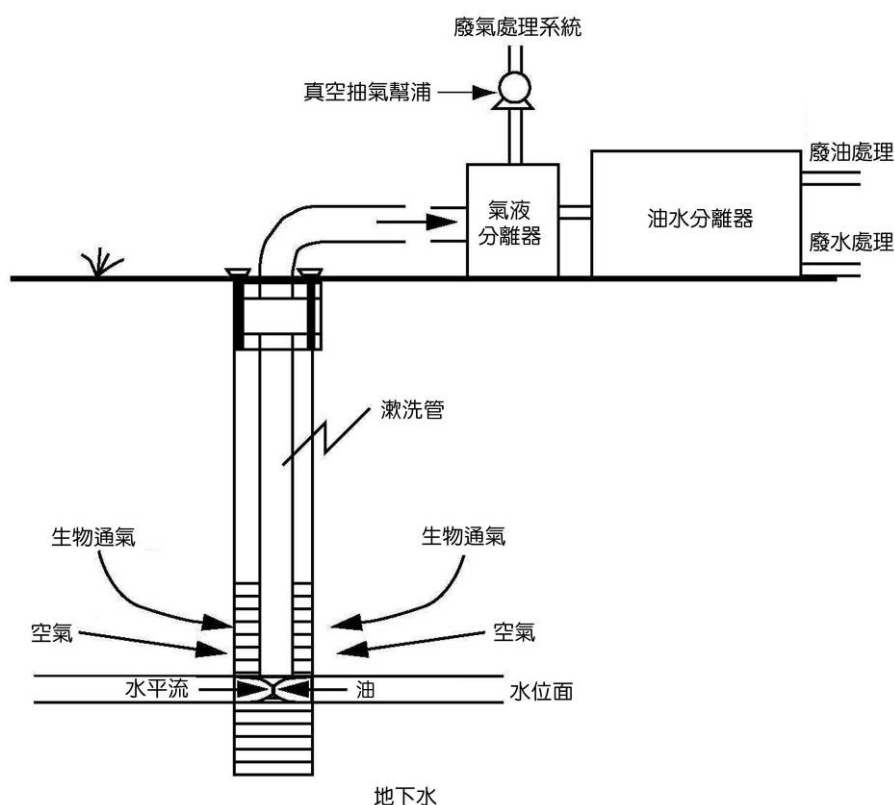


圖 5-28 生物漱洗法示意圖^[80]

表 5-19 生物漱洗法優缺點彙整表^[81]

優點	缺點
• 相較於其他整治技術，生物漱洗法回收浮油的效率高，可節省浮油儲存、處理及最終處置之整治經費。 • 當系統控制於最低抽氣速率，使廢氣中之揮發性有機物濃度低於法規管制值，而可直接排放，降低整治費用。 • 因避免地下水面產生波動，可使污染擴散之現象減到最低。 • 系統經設計後，可進行水力控制，避免污染團的移動。 • 系統在通氣層所產生的真空現象，促使原殘留於土壤細小孔隙中的碳氫化合物被抽除出來。 • 在浮油回收工作完成後，生物漱洗系統易被轉換為生物注氣系統，繼續進行污染整治工作。	• 常用的幫浦型式(如 liquid ring pump)易使抽出液體產生乳化現象，特別是液體中含有柴油的情形。 • 因為生物漱洗系統所產生之通氣作用，可能會於井篩上產微生物阻塞(biofouling)現象。 • 生物漱洗系統無法處理殘留於飽和層土壤中之污染物。

二、應用

生物漱洗法主要用以處理受石油碳氫化合物(油品)所造成之自由相污染之地下水層，結合真空加強浮油回收、生物通氣與土壤氣體抽除法，由油與空氣的界面上，將浮油、少量地下水與土壤氣體經由漱洗管予以抽除，於抽除浮油之同時，可促進通氣層微生物對不含鹵素原子之揮發性有機物、半揮發性有機物之生物降解作用。對於生物漱洗法各類污染物回收機制與污染場址之性質有關，生物通氣作用為低揮性油品土壤污染場址之主要污染物回收機制，揮發作用則為高揮性油品土壤污染場址之主要污染物回收機制，同時結合兩者之作用，使生物漱洗法可有效地回收毛緣層內與地下水面上的浮油。生物漱洗法主要由水平方向抽除浮油，與傳統雙幫浦浮油回收系統須利用洩降錐及汲油器抽除浮油的方式有所不同，如圖 5-29 所示。

在許多採用生物漱洗法的整治場址中，最為困擾的問題之一是操作生物漱洗系統所產生之漂浮性固體與乳化物，這些物質像泡沫般的浮在抽出的浮油與地下水間。漂浮性固體與油水乳化物會在氣體與液體進入真空幫浦前之漱洗管中，因真空抽氣作用而形成，或於進入真空抽氣機中，因混合作用而形成。一般而言，漂浮性固體與油水乳化物為相對穩定的物質，會降低傳統重力式油水分離設備的功能。解決方法之一，乃

將原激洗管改成抽油管與水/土壤氣體抽除管，接至真空幫浦，如圖 5-30 所示，其中，抽油管開口端位於油水界面上約 1/2 吋處，水/土壤氣體抽除管則置於油水界面上，外面並以隔離套管將浮油隔開，由於此一改良式生物激洗系統，分別抽除浮油與地下水/土壤氣體，可以避免空氣、油與水因混合產生漂浮性固體與油水乳化物之現象。

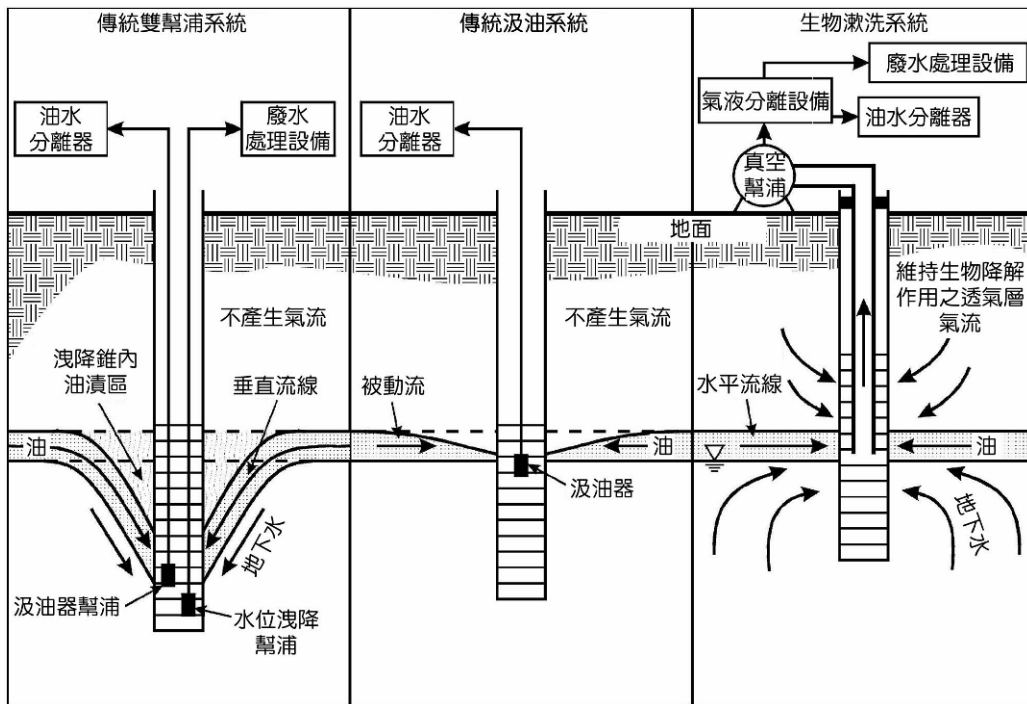


圖 5-29 傳統雙幫浦、汲油器與生物激洗法浮油回收方式之比較^[82]

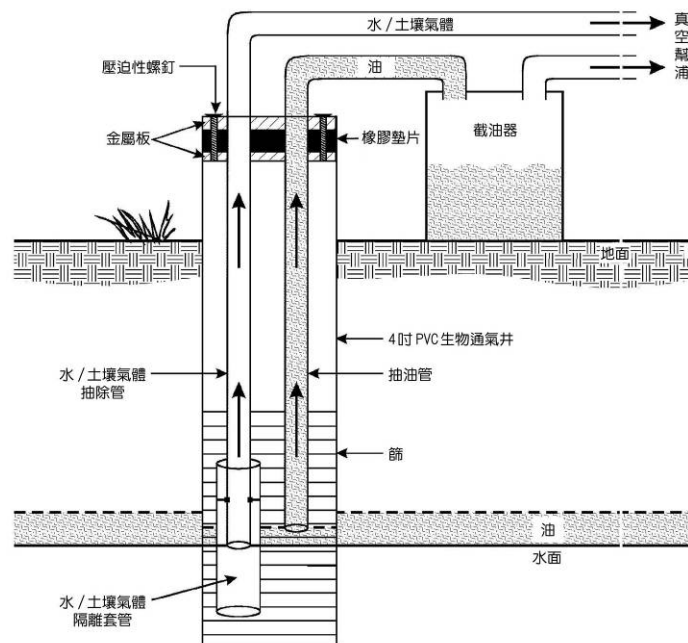


圖 5-30 井內油水分離式之生物激洗系統示意圖^[82]

三、處理成效

1997 年，美國環保署與美國空軍將多相抽除法(含生物漱洗法) 列為可據以推定的整治技術(presumptive remedy)，可以處理土壤及地下水中的揮發性有機物。多相抽除法最大的處理困難點在油水乳化的傾向，油水乳化現象必須在後續處理或處置前，被破壞或將油水分離開來。在浮油回收效率上，生物漱洗法相較於汲油器與幫浦抽除技術有較高的回收效率。

四、技術限制

污染場址應用生物漱洗法之限制因素包括：

- (一) 在低滲透性土壤中，生物漱洗法整治成效不佳。
- (二) 在低含水量土壤中，可能會限制生物降解作用與生物通氣的效果，因為生物漱洗法可能將土壤中的水分帶走，使土壤乾燥。
- (三) 好氧生物降解無法處理含氯有機物。
- (四) 在初期整治階段，生物漱洗法所產生的廢氣在排放前，應先進行處理，但很快會因廢氣中揮發性污染物濃度的降低，而不再需進行廢氣處理。
- (五) 在許多整治案例中，生物漱洗法可能產生大量廢水，且應視污染濃度狀況，於排放前先行妥善處理。
- (六) 由於在真空抽除過程中，將油、水、空氣混合，可能需要特別的油水分離設備，將混合物予以分離或處理的技術。

5.4 整治案例介紹

5.4.1 固定/穩定化法整治案例

有關土壤固化/穩定化處理技術在國內已有多項整治案例，此技術並廣泛運用於我國有害事業廢棄物處理。惟我國對於土壤固化物並未訂有相關處理標準或規範，國內實際運作方式多比照事業廢棄物處理方式辦理，並於固化後進入事業廢棄物掩埋場進行分區掩埋。

本案例場址位於宜蘭縣龍德工業區內(污水處理廠對面)，環保署督察大隊、環檢所於 91 年 1 月 22 日會同該縣環保局進行土壤採樣，檢驗結果顯示在 5 個採樣點中，土壤重金屬濃度分別為鎘 6.34~39.2 mg/kg、鉻 785~29,900 mg/kg、銅 61.3~3,260 mg/kg、鎳 179~9,860 mg/kg，已達土壤污染管制標準。宜蘭縣環保局遂於 91 年 4 月 2 日公告該場址為控制場址。

該場址因受緊臨電鍍工廠所產生之廢液及硫酸、磷酸空桶棄置該場址土地上，並直接滲入土壤中，污染土壤中鎘、鉻、銅、鎳等重金屬濃度超過土壤污染管制標準。

本場址之污染整治方法採用將高污染土壤挖除，挖除之污染土壤分批委託國內固化處理機構處理後掩埋。國內固化處理技術為固定式處理設施，處理單價約 10,000 元/公噸以上，包括移除土壤之清運、處理及最終處置(掩埋)之費用。

5.4.2 土壤清洗法整治案例

土壤清洗法已廣泛地應用於歐美，處理費用約美金 100~250 元/公噸，約新台幣 3,500~8,600 元/公噸。在歐洲則有移動式及固定式 2 種土壤清洗設施，在歐洲固定式土壤清洗技術市場較成熟的國家，其整治費用單價約美金 25~125 元/公噸(約新台幣 850~4,300 元/公噸)。

美國 Joint Small-Arms Range 土壤重金屬鉛污染場址，經土壤物理分離/酸溶出(physical separation and acid leaching)系統處理，處理約 3,500 mg/kg 鉛之污染土壤，污染土壤濃度下降至 200 mg/kg，而 TCLP 檢驗之鉛濃度則下降至大約為 2 mg/L，推估處理 10,000 噸污染土壤之平均處理成本(含開挖費用)其單價約美金 169 元/噸(約台幣 6,000 元/噸)。物理分離系統如圖 5-31 所示。

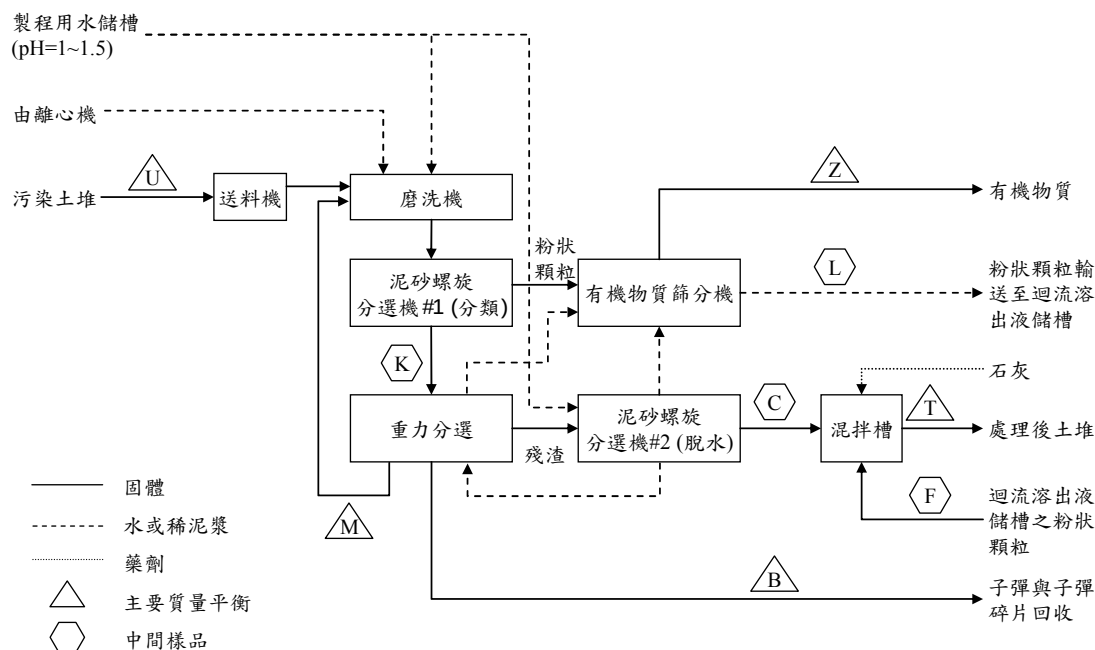


圖 5-31 美國 Small-Arms Range 鉛污染場址物理分離程序^[83]

5.4.3 土壤酸洗法整治案例

一、整治案例 A^[84]

(一) 場址背景

北部某縣市 D、F 二工區場址計有 44 筆地號（面積約為 10.36 公頃）主要為鉻、銅、鋅、鎳等重金屬污染之農地，其中 F 區中約有 0.98 公頃之農地亦有重金屬鎘、鉛之污染，D 區污染調查初步結果顯示鉻的最高濃度為 1,560 mg/kg(為土壤污染管制標準值 6.24 倍)，銅的最高濃度為 1,360 mg/kg(為土壤污染管制標準值 2.72 倍)，鋅的最高濃度為 1,360 mg/kg(為土壤污染管制標準值 2.72 倍)，鎳的最高濃度為 583 mg/kg(為土壤污染管制標準值 2.97 倍)；F 區污染調查初步結果顯示鉻的最高濃度為 1,730 mg/kg(為土壤污染管制標準值 6.91 倍)，銅的最高濃度為 582 mg/kg(為土壤污染管制標準值 2.91 倍)，鋅的最高濃度為 661 mg/kg(為土壤污染管制標準值 1.10 倍)，鎳的最高濃度為 706 mg/kg(為土壤污染管制標準值 3.53 倍)，而其中 0.98 公頃一發現鎘、鉛之存在，鎘的最高濃度為 18.9 mg/kg(為土壤污染管制標準值 3.78 倍)，鉛的最高濃度為 606 mg/kg(為土壤污染管制標準值 1.21 倍)。整治目標為改善至土壤污染管制標準以下，恢復農地農用原則，即鎘 5 mg/Kg、鉻 250 mg/Kg、銅 200 mg/Kg、鎳 200 mg/Kg、鉛 500 mg/Kg 及鋅 600 mg/Kg。

(二) 整治方法

除 F 區約有 0.98 公頃之農地受重金屬鎘、鉛之污染，其污染改善方式採「土壤酸洗法」搭配「土壤翻土混合稀釋法」處理外，其餘 9.38 公頃主要為鉻、銅、鋅、鎳等重金屬污染之農地，污染改善方式採「土壤翻土混合稀釋法」處理，改善工程實施流程如圖 5-32 所示。

(三) 土壤酸洗法概念設計

採取批次式全浸泡式混合攪拌，處理時將污染土壤置入反應槽，與萃取液充分接觸反應後，再進行固液分離。分離之酸洗處理後土壤，經添加適當鈣鎂肥(農用石灰)調理酸鹼性後再予回填回農地，再配合全區翻耕混合工程與原現地土壤混合，並經採樣檢驗以確認污染整治效果。

(四) 酸洗及廢水處理系統

根據模場試驗之酸萃取液之配比及其效率、固液分離、廢液處理之測試結果後，進行酸洗及廢水處理系統之規劃與設計。

1. 系統設計特性

本系統之主要特性如下：

- (1) 採全浸泡式混合攪拌之酸洗方式。
- (2) 採批次式處理，每槽每批次處理土壤量達 1.8 m^3 ，每批次酸洗流程約 2~2.5 小時。共設置 2 座酸洗反應槽，每日 4~5 批次，最大設計處理量約 18 m^3 。
- (3) 處理時將污染土壤置入反應槽，與萃取液充分接觸反應後，以重力沉降方式進行固液分離。
- (4) 酸液為重複回收使用，每日最後一批酸洗廢液才進入廢水處理系統處理。
- (5) 廢水處理系統為零排放設計，經三級處理後清水回收，僅產生化學混凝沉澱污泥，經太空包裝袋後以有害事業廢棄物方式依廢清法規定，委託合格之甲級清除處理機構清運處理。

(五) 成本估算

D、F 二工區之酸洗處理整治經費(含稅)約新台幣 2,830,000 元，詳表 5-20 計算說明。

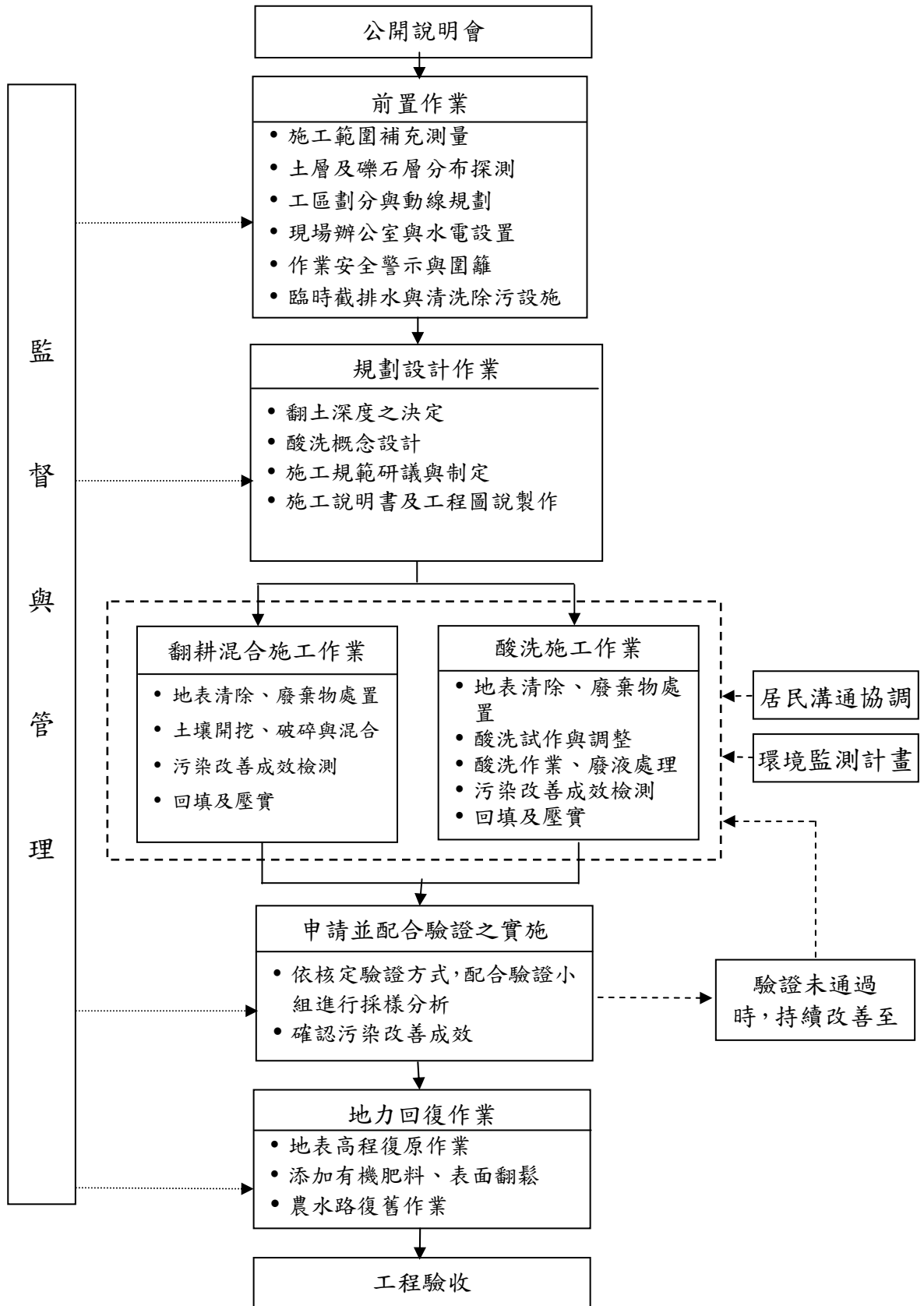


圖 5-32 污染改善工程實施流程圖^[84]

表 5-20 酸洗處理經費整理表^[84]

項次	工作項目	單位	數量	單價(元)	複價(元)
一、模場試驗		式	1	250,000	250,000
二、設備製造組裝					1,500,000
1.	酸洗設備租賃維護	式	1	350,000	350,000
2.	廢水處理設備租賃維護	式	1	1,000,000	1,000,000
3.	整地及不透水布鋪設	式	1	50,000	50,000
4.	圍籬、截排水	式	1	100,000	100,000
三、操作費用					540,000
1.	藥品費	式	1	25,000	25,000
2.	土壤開挖回填搬運費	式	1	45,000	45,000
3.	挖土機	月	1.5	140,000	210,000
4.	水電費	月	2	30,000	60,000
5.	廢水處理設備操作費	式	1	150,000	150,000
7.	安全衛生設備費	式	1	30,000	30,000
四、施工前補充細密調查費		式	1	250,000	250,000
伍、環境監測費		式	1	200,000	200,000
六、污泥處理費		式	1	90,000	90,000
總計					2,830,000

二、整治案例 B^[85]

(一) 場址背景

本計畫工作範圍主要針對中部某縣市轄區內農地土壤重金屬鎘超過管制標準之約 20.5 公頃區域(以坵塊區分)進行土壤污染改善工作，總地號筆數約有 96 筆，污染情形如表 5-21 所示。其中，鉻、鎘、銅污染程度在 2 倍標準以下約佔七成農地，然值得注意的是有將近 11.2% 的農地鎘污染程度大於 8 倍標準；而鋅、鎳污染程度在 3 倍標準以下亦約佔七成農地。整治時間一年，預計整治目標為將土壤中鎘金屬濃度降低至土壤污染監測基準以下，其他重金屬濃度降低至土壤污染管制標準以下。

(二) 固定式土壤酸淋洗法

遭受重金屬污染之農地，其重金屬種類為鎘、汞、鉛者，且鎘重金屬濃度大於 10 mg/kg 者(面積約 5.02 公頃)，污染土方共 980 立方公尺，為避免同批次進行酸淋洗土方量過大，無法因應突發事件之應變(如豪大雨、颱風)及場址現場使用空間之考量，將酸洗土壤作業分為 3 批次進行。

表 5-21 公告場址重金屬污染濃度超過管制標準倍數之地號數

超過管制標準倍數 (以食用作物標準比較)	超過管制標準倍數之地號數				
	鉻 250 mg/kg	鎘 5 mg/kg	銅 200 mg/kg	鋅 600 mg/kg	鎳 200 mg/kg
<2 倍	74	64	69	56	47
2 倍~3 倍	6	19	7	15	19
3 倍~4 倍	5	2	6	7	9
4 倍~5 倍	4	1	4	2	7
5 倍~6 倍	4	0	2	3	5
6 倍~7 倍	2	2	2	6	3
7 倍~8 倍	1	0	3	4	2
>8 倍	2	10	5	5	6
合計	96	96	96	96	96

1. 場址污染改善作業

- (1) 需酸淋洗之土壤於搬運前，先以迴轉犁先進行破碎及混合之作業，減少因土壤粒徑差異過大降低酸淋洗之效果。破碎後之土壤搬運至酸淋洗作業場址，依據各地號分別堆放至待酸淋洗平台上，各地號之間以木板作為區隔。
- (2) 於待酸淋洗土堆區四周挖掘集酸溝，寬 0.4 m、深 0.5 m。並於待酸淋洗土堆平台末端挖掘 8×2×0.7 m 之儲酸槽。集酸溝及儲酸槽均鋪上不透水布，使酸淋洗時滲出之酸液能匯流至儲酸槽。
- (3) 於廢水處理區、混酸區進行槽桶之架設及各項管線馬達配裝。
- (4) 進行配墊盤、電纜及控制室之裝設。
- (5) 於待酸淋洗之土堆上，架設水平之淋洗管線，淋洗管線每隔 10 ~30 cm 開鑿一小孔，使淋洗之酸液能均勻淋灑土堆上。於待酸淋洗土堆中每隔 1 m 插入 1 inch 之透水管，使酸液能藉由之垂直透水管均勻入滲土壤中。

2. 酸淋洗作業

固定式酸淋洗法示意圖詳見圖 5-33 及圖 5-34。

- (1) 淋洗作業前，先以清水進行試車，確認各設備運轉正常後，在進行實際運轉。
- (2) 每一批次土堆進行酸淋洗前，先淋洗 0.02% 10 公噸之過氧化氫於土堆上，改變土壤中之重金屬氧化還原態，以利後續之酸淋洗成效。

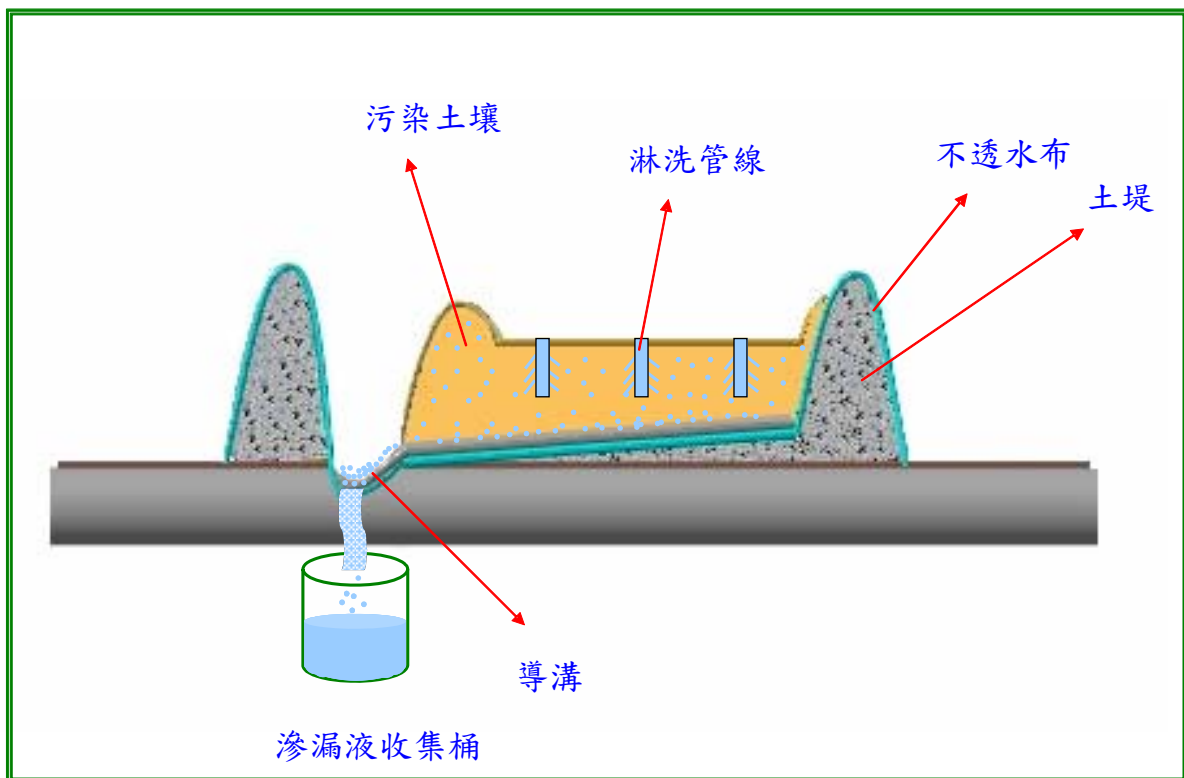


圖 5-33 酸淋洗法示意圖(一)

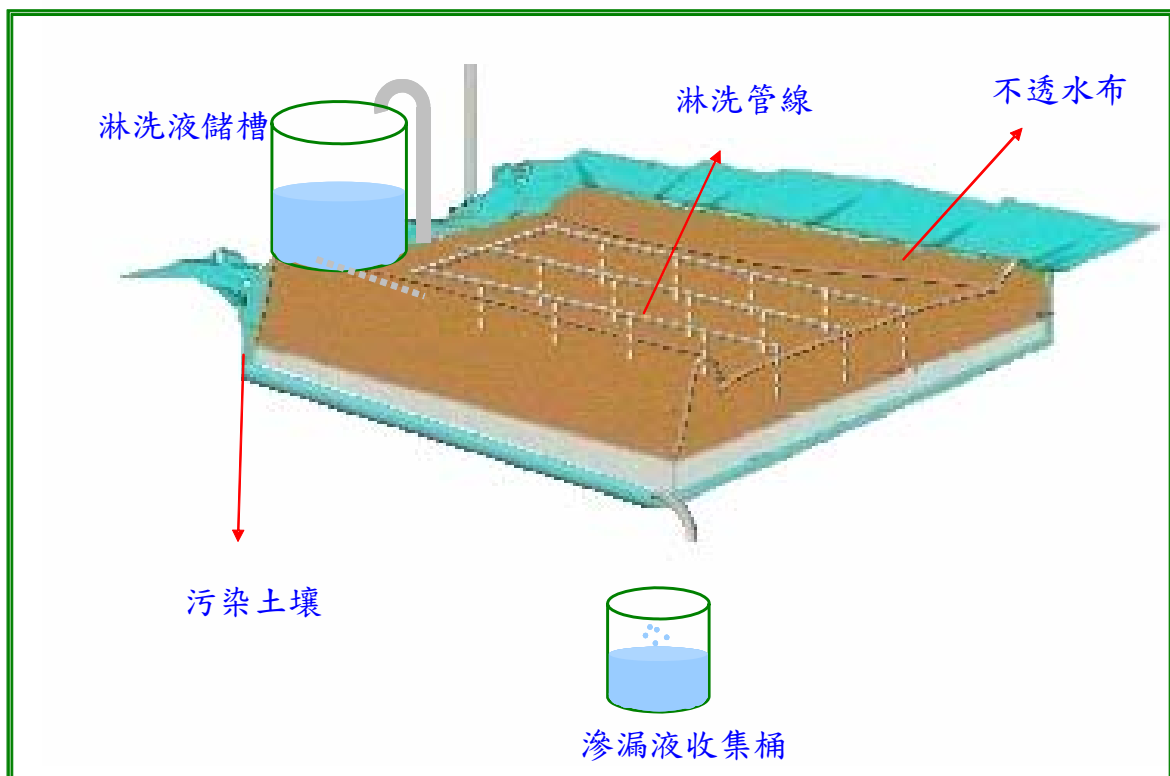


圖 5-34 固定式酸淋洗法示意圖(二)

- (3) 配置混合酸液(0.1 M 鹽酸 + $5.2 \times 10^{-6}\text{ M}$ 檸檬酸)，混合好之酸液儲放於混酸槽中備用。
- (4) 混合好之酸液以輸酸馬達輸送，藉由淋洗管線均勻淋洗於土堆上，每日淋洗 10~20 公噸之酸液。
- (5) 淋洗之酸液滲透過土壤後，廢水之部分導入廢水系統中處理，處理好之清水供後續調配酸液使用。
- (6) 於淋洗作業期間，以 AA、XRF 及 ICP 進行內部成果檢測，以確認污染改善之成效。
- (7) 檢測結果如重金屬鎘濃度仍超過 10 mg/kg ，重複步驟(3)持續進行酸淋洗，以增加酸淋洗之效果。如檢測結果重金屬鎘濃度低於 10 mg/kg 時，則停止酸淋洗作業，以 30 公噸清水進行土壤之清洗。

3. 廢水處理

針對固定式酸淋洗產生之廢水，導入廢水系統中，廢水之處理流程如圖 5-35 所示。

- (1) 儲酸槽之廢水經沉水馬達抽移至初沉槽，先進行初步之固液相分離後，將上層之澄清液部分，再導入後續之處理單元，以降低後續單元之固體負荷。
- (2) 廢水經初步沉降後，導入中和槽中，利用 NaOH 先調整廢水 pH 值至 9 左右，以利後續混凝沉降。
- (3) 調整完之廢水導入混凝槽中，加入 PAC 幫助膠羽之產生。
- (4) 經過混凝槽之廢水再導入膠凝槽中，加入 polymer 作為助凝劑，加強混凝之效果。
- (5) 處理後之廢水導入沉澱槽中，上層澄清液部分溢流至中間槽。沉澱之污泥，排泥至污泥重力脫水太空包架台，以太空包裝袋後，利用重力去除部分之水分後，太空包之污泥委託合格之廠商外運處理。
- (6) 澄清液部分以砂濾去除澄清液中殘餘之懸浮微粒，以保護後續之 RO 逆滲透機組。
- (7) 最後以 RO 逆滲透機組，將部分不易沉降分離之鹽度去除，產生之清水，回收至混酸區供調配酸液之清水來源，作業期間達到廢水零排放。

中和槽		混凝、膠凝槽	
廢水處理添加藥劑區		RO系統	
排泥區		混凝膠凝後之廢水	

圖 5-35 廢水處理系統設備

5.4.4 植生復育案例介紹^[86]

美國康乃迪克州恩賽比克佛公司污染場址，係天燃燒及爆裂作業所引起，導致土壤表層含鉛量達 635 mg/kg，場址大部分區域含鉛量大於 1,000 mg/kg，部分區域則高達 4,000 mg/kg。

本場址於 1996 年至 1997 年間，首先在露天燃燒及爆裂區周邊約 6,000 平方公尺範圍內實施植栽，再於 1998 年擴大實施規模至 9,510 平方公尺，期以植生復育法降低土壤中鉛含量及鉛溶出的情形。場址中植栽印第安芥菜及向日葵，土壤中施以氮、磷等肥料，及利用鉀、石灰等調整土壤 pH，肥料及石灰約施入土內 15 至 20 公分處，並以懸吊式灑水系統保持土壤溼度，灑水系統中添加葉狀物肥料，規劃在 6 個月內收割 3 次。

除部分地區作物生長不佳外，大部分作物生長情況良好。於植栽後 6 個月結果顯示，土壤含鉛量由 635 mg/kg 降到 478 mg/kg。植物中鉛萃取量介於第 1 次收割作物的 342 mg/kg(乾基)與第 3 次收割作物的 3,252 mg/kg 之間。印第安芥菜及向日葵之平均萃取鉛量大致相同，各期收割作物之平均萃取量約 1,000 mg/kg(乾基)。

5.4.5 土壤氣體抽除法^[87]

美國加州英特西爾/西門子(Intersil/Siemens)超級基金場址，位於美國加州卡朴提諾(Cupertino)郊區，佔地約 48,564 平方公尺，為 2 家半導體業者所擁有之工業用地，其中英特西爾公司於 1967 年至 1988 年間於此地生產半導體與晶圓製品，西門子公司則自 1978 年起，於此地生產半導體產品。2 家工廠在生產過程中，都必須使用大量化學品，如蝕刻液、有機溶劑及化學混合物等，並在工廠運作過程中，造成土壤及地下水污染，污染物種類包括揮發性有機物及半揮發性有機物(主要污染物為三氯乙烯)，並於 1990 年被列為超級基金場址。

該場址在被列為超級基金場址前，自 1988 年已著手整治工作，採土壤氣體抽除法為主要整治技術，設置 4 座垂直式土壤氣體抽氣井，1991 年增設 3 座抽氣井。其中 6 座抽氣井以成對方式沿英特西爾廠房東區設置，成對抽氣井中的 1 座設置於淺層透氣層土壤(約 3 至 15 公尺)處，另 1 座設於深層透氣層土壤(約 18~30 公尺)處。抽除氣體經過活性碳罐，以吸附污染物。每座抽氣井空氣流量設定於 3~38 scfm。整治工作於 1993 年結束，檢測結果顯示，80 個土壤樣品中有 79 個低於整治目標。1988 年至 1992 年，去除率由每日約 7 公斤漸減為 0.2 公斤，總共處理約 1,360 公斤三氯乙烯，處理土壤體積約

214,088 立方公尺。

5.4.6 土壤戴奧辛污染整治案例^[88]

平成六年(1994 年)，日本和歌山縣橋本市事業廢棄物處理機構非法焚化處理事業廢棄物，經日本和歌山縣相關單位調查發現，於焚化爐附近土壤戴奧辛濃度達 100,000 pg-TEQ/g。戴奧辛濃度超過 1,000 pg-TEQ/g 之污染土壤約有 2,602 立方公尺，依日本和歌山縣政府、橋本市政府與專家學者共同協議，擬將受污染土壤予以挖除，並將戴奧辛濃度介於 1,000~3,000 pg-TEQ/g 之污染土壤進行固化掩埋，3,000 pg-TEQ/g 之污染土壤採無害化處理方式(熔融處理)。

經挖除之受污染土壤，先經分選，將污染土壤與廢棄物分離開來，分選後的廢棄物與可燃物經水洗程序後，運至廠外處理，受污染土壤與污泥等，則利用設置於場址之熔融爐進行處理，處理流程如圖 5-36 所示。熔融處理前土壤戴奧辛污染濃度平均約 15,000 pg-TEQ/g，高污染土壤約 670 立方公尺，熔融設施具有 3 個熔爐，分階段處理受污染土壤，1 次約可處理 100 公噸受污染土壤，共 17 次才能完全處理該廠之高污染土壤，戴奧辛土壤污染整治目標為 1,000 pg-TEQ/g，熔融固化體戴奧辛平均濃度為 0.0017 pg-TEQ/g。

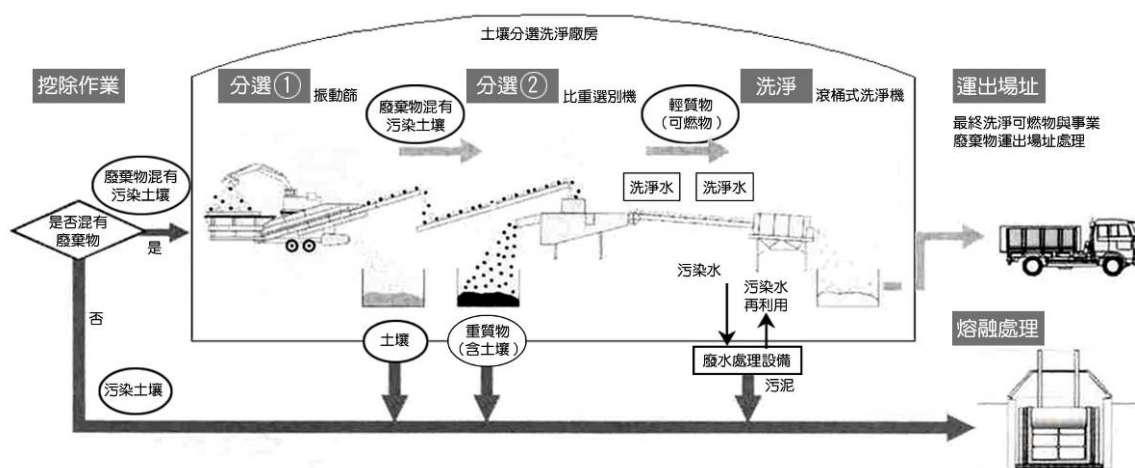


圖 5-36 日本和歌山縣橋本市土壤戴奧辛污染整治流程圖

5.4.7 空氣注入法搭配土壤氣體抽除整治案例^[89]

彰化市某加油站油品污染整治案例，該站因地下水中苯含量超過地下水污染第二類管制標準，於 91 年 2 月 18 日由彰化縣政府公告為控制場址，隨後進行污染改善工作，於 92 年 9 月 25 日公告解除控制場址之管制。本場址

可能污染物質為汽油及柴油，屬輕質之非水相液體(LNAPL)。場址使用之改善技術包括土壤氣體抽出(SVE)、地下水空氣注入(AS)及浮油回收法。

由加油站既有之地下水監測井設置過程之土壤取樣紀錄顯示，場址所在地之表層土壤大部分為粉土，並夾雜少部分黏土，深度約在地表下 1~2 公尺，地下水含水層組成則以粉砂為主。

該場址整治工作經由空氣注入法輔助其他整治方法後，於 9 個月內使地下水中苯濃度由最高之 10.8 mg/L 降至 0.02 mg/L，顯示在土壤地下水在地下水位不深，且地質均勻、通氣條件良好的情形之下，相當適用 AS/SVE 之整治技術，且可以在相當短(1 年內)時間內，達成污染改善目標。

5.4.8 現地地下水生物整治案例^[90]

美國南加州 South Beach Marina 加油站地下儲油槽污染場址，該場址採用現地地下水生物整治法，於場址注入或培養現地微生物進行污染物降解工作。本場址主要關切污染物為地下水中的 MTBE、BTEX 及萘污染，自 1999 年 2 月開始進行全場整治工作，於地面調配含有下列成分之混和液後，由注入井注入地下水層中：

- 一、包括 *Pseudomonas*，*Bacillus* 及 *Corynebacterium* 微生物之混合液。
- 二、含氧乳化劑(oxygen emulsifier)。
- 三、界面活性劑。
- 四、封膠(encapsulant)。
- 五、營養鹽。

場址地下水含水層深度為地下 4.32 至 6.92 英尺(約 1.3 公尺至 2.1 公尺)，平均水力坡降為 0.078 ft/ft，地下水流速為每年 1.95 公尺左右。整治期間每月注入之混合液量由 600~700 加侖不等，除透過注入井外，現場視污染物降解狀況，以 Geoprobe®之現地注入方式注入混合液。

整治結果顯示，MTBE 降解效率約達 96%以上(從 3,310 至 146 µg/L)，苯降解效率約達 83%以上(從 2,571 至 435µg/L)，甲苯降解效率約達 66%以上(從 24,330 至 8,300µg/L)，2001 年 2 月完成所有整治工作，總整治期程約 2 年。至於總經費約為 63,500 美金(約新台幣 2,032,000 元)。

參考文獻

1. 經濟部工業局，金屬表面處理業土壤及地下水污染預防與整治技術手冊，民國 94 年 12 月。
2. 經濟部工業局，土壤及地下水污染整治技術手冊 - 石化業，民國 92 年 6 月。
3. USEPA, Innovative site remediation technology. Design & Application. Volume 4. Stabilization/Solidification, EPA 542-B97-007, 1997.
4. USEPA, Engineering Bulletin Solidification/Stabilization of Organics and Inorganics, EPA/540/S-92/015, 1993.
5. USEPA, Technology alternatives for the remediation of soils contaminated with As, Cd, Cr, Hg, and Pb, EPA/540/S97/500, 1997.
6. Federal Remediation Technologies Roundtable (FRTR), Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, Version 4.0 Ch. 3-2 In Situ Physical/Chemical Treatment – 4.9 Solidification/Stabilization, 2005.
7. USEPA Best Management Practices (BMPs) for Soil Treatment Technologies : Suggested Operational Guidelines to Prevent Crossmedia Transfer of Contaminants During Clean-UP Activities, EPA OSWER, EPA-530-R-97-007, 1997.
8. USEPA, Abstracts of Remediation Case Studies, EPA-542-R-00-006, 2000.
9. 葉琮裕，污染土壤現地玻璃化處理技術，環檢所雙月刊，第 57 期，民國 90 年 11 月。
10. USEPA, Contaminants and Remedial Options at Selected Metal-Contaminated Sites, EPA/540/R-95/512, 1995.
11. Roote, D.S. In Situ Flushing, Technology Overview Report, Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, Pittsburgh, PA, USA, 1997.
12. Roote, D.S. In Situ Flushing, Technology Status Report, Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, Pittsburgh, PA, USA, 1998.
13. Doong, R. A., Wu, Y. W., Lei, W. G. Surfactant enhanced remediation of cadmium contaminated soil. Water Sci. Technol. 37, 65-71, 1998.
14. Navis, B. T., Sabatini, D. A., Shiau, B. J., Harwell, J. H. Surfactant enhanced remediation of subsurface chromium contamination. Wat. Res. 30, 511-520, 1996.
15. Yin, Y., Allen, H.E. In Situ Chemical Treatment, Technology Evaluation Report, Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, Pittsburgh, PA, USA, 1999.
16. USEPA, Guide for Conducting Treatability Studies Under CERCLA, Soil Vapor Extraction, EPA-540-2-91-019A, 1991.
17. USEPA, How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground

- Storage Tank Sites-A Guide for Corrective Action Plan Reviewers, EPA 510-B-94-003, 1994.
18. Naval Facilities Engineering Service Center (NFESC) web site (<http://www.nfesc.navy.mil/>).
 19. National Public Health Institute (Finland), Polychlorinated Dibenzo-p- dioxin and Dibenzofuran contamination of Sediments and Photochemical Decontamination of Soils, 2004.
 20. USEPA, Reference Guide to Non-combustion Technologies for Remediation of Persistent Organic Pollutants in Stockpile and Soil, 2005.
 21. Homebush Bay Remediation website (<http://www.rhodesremediation.nsw.gov.au/index.html>).
 22. USEPA, A Citizen's Guide to Pump and Treatment, EPA 542-F-01-025, 2001.
 23. USEPA, Arsenic Treatment Technologies for Soil, Water and Waste, EPA-542-R-02-004, 2002.
 24. USEPA, Technologies and Costs for Removal of Arsenic From Drinking Water. EPA-R-00-028. Office of Water. http://www.epa.gov/safewater/ars/treatments_and_costs.pdf , 2000.
 25. Miller J.P., Hartsfield T.H., Corey A.C., Markey R.M. In Situ Environmental Remediation of and Energized Substation. EPRI. Palo Alto, CA. Report No. 1005169, 2001.
 26. MSE Technology Applications, Inc. Arsenic Oxidation Demonstration Project - Final Report. January 1998. <http://www.arsenic.org/PDF%20Files/Mwtp-84.pdf>
 27. USEPA, Office of Research and Development. Regulations on the Disposal of Arsenic Residuals from Drinking Water Treatment Plants. Office of Research and Development, EPA-600-R-00-025, 2000.
 28. USEPA, Office of Research and Development. Arsenic & Mercury - Workshop on Removal, Recovery, Treatment, and Disposal. EPA-600-R-92-105, 1992.
 29. Twidwell, L.G., et al. Technologies and Potential Technologies for Removing Arsenic from Process and Mine Wastewater. Presented at "REWAS'99." San Sebastian, Spain, September 1999. <http://www.mtech.edu/metallurgy/arsenic/REWASAS%20for%20proceedings99%20in%20word.pdf>
 30. USEPA, Arsenic Removal from Drinking Water by Ion Exchange and Activated Alumina Plants. EPA 600-R-00-088. Office of Research and Development, 2000. <http://www.epa.gov/ncepi/Catalog/EPA600R00088.html>
 31. Federal Remediation Technologies Reference Guide and Screening Manual, Version 3.0. Federal Remediation Technologies Roundtable. March 30, 2001. http://www.frtr.gov/matrix2/top_page.html.
 32. Vidic, R. D., Pohland, F. G. Treatment Walls, Technology Evaluation Report,

- Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, Pittsburgh, PA, USA, 1996.
33. Starr, R. C., Cherry, J. A. In Situ Remediation of Contaminated Ground Water : The Funnel-and-Gate System, *Ground Water*, 32, 465-476, 1994.
 34. Johnson, T. L., Scherer, M. M., Tratnyek, P. G., Kinetics of Halogenated Organic Compound Degradation by Iron Metal, *Environ. Sci. Technol.*, 30, 2634-2640, 1996.
 35. ITRC, Advanced Techniques on Installation of Iron Based Permeable Reactive Barriers and Non-iron Based Barrier Treatment Material By Permeable Reactive Barrier Wall Team of the ITRC, 2002. http://www.cluin.org/conf/itrc/advprb_032102/
 36. LaGrega, M.D., Buckingham, P.L., Evans, J.C. The Environmental Resources Management Group. Hazardous Waste Management. McGraw-Hill, Singapore, 1994.
 37. USEPA, Permeable Reactive Barrier Technologies for Contaminant Remediation, EPA-600-R-98-125, 1998.
 38. NFESC, Air Sparging Guidance Document, 2001.
 39. USEPA, How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites-A Guide for Corrective Action Plan Reviewers, EPA 510-B-95-007, 1995.
 40. Acar, Y. B. and Alshawabkeh A. N. Principles of Electrokinetic Remediation. *Environmental Science and Technology*, 27(4) : 2638~2647, 1993.
 41. Banerjee, S., Horng, J. J. and Ferguson J. F. Field Experience with Electrokinetics at a Superfund Site. *Transportation Research Record* 1312: 167~174, 1991.
 42. Bruell, C. J., Segall, B. A., and Walsh M. T. Electro-osmotic Removal of Gasoline Hydrocarbons and TCE from Clay. *Journal of Environmental Engineering*, 118(1): 68~83, 1992.
 43. Higgins, T. E., Halloran A. R., and Petura J. C. Traditional and Innovative Treatment Methods for Cr(VI) in Soil. *Journal of Soil Contamination*, 6(6) : 767~797, 1996.
 44. Ho, V. S., Sheridan, W., Athmer, C. J., Heitkamp, M. A., Brackin, J. M., Weber, D. and Brodsky, P. H. Integrated In Situ Soil Remediation Technology : the LasagnaTM Process. *Environmental Science and Technology*, 29(10) : 2528~2534, 1995.
 45. Shapiro, A. P. and Probstein R. E. Removal of Contaminants from Saturated Clay by Electroosmosis. *Environmental Science and Technology*, 27(2) : 283~291, 1993.
 46. Virkutyte, J., Sillanpää, M. and Latostenmaa, P. Electrokinetic Soil Remediation-

- Critical Overview. The Science of the Total Environment, 289(1): 97~121, 2002.
47. Yu, J. W. and Neretnieks, I. Theoretical Evaluation of a Technique for Electrokinetic Decontamination of Soils, Journal of Contaminant Hydrology, No. 4, Vol. 26, pp. 291~299, 1997.
 48. Vane, M. L. and Zang, G. M. Effect of Aqueous Phase Properties on Clay Particle Zeta Potential and Electro-osmotic Permeability : Implications for Electro-kinetic Soil Remediation Processes. Journal of Hazardous Materials, 55(3): 1~22, 1997.
 49. Acar, Y. B., Gale, R. J., Alshawabkeh, A. N., Marks, R. E., Puppala, S., Bicka, M., and Parker, R. Electrokinetic Remediation : Basics and Technology Status. Journal of Hazardous Materials, 40(2) : 117-137, 1995.
 50. USEPA, Superfund Innovative Technology Evaluation Program, Technology Profiles 10th Ed. EPA/540/R-99/500a, Vol. 1, pp. 194-195; 202-203; 224-225, 1999.
 51. Shapiro, A. P., Renaud, P. C., and Probst, R. F. Preliminary Studies on the Removal of Chemical Species from Saturated Porous Media by Electroosmosis. Physicochemical Hydrodynamics, 11(56): 785-802, 1989.
 52. 鄭孟嘉,「以電化學方法處理受鎘、鉛污染土壤之研究」,國立臺灣大學化學工程學研究所,民國 89 年。
 53. Yu, J. W. and Neretnieks I. Theoretical Evaluation of a Technique for Electrokinetic Decontamination of Soils. Journal of Contaminant Hydrology, 4(26) : 291~299, 民國 86 年。
 54. 紀吉鴻,「電動法結合徑向電場及抽取系統處理重金屬污染土壤之實驗室研究」,國立雲林科技大學環境與安全工程技術研究所碩士論文,1999。
 55. Krishna, R. R., Parupudi, U. S., Devulapalli, S. N. and Xu, Y. C. Effects of Soil Composition on the Removal of Chromium by Electrokinetics. Journal of Hazardous Materials, 55(3): 135~158, 1997.
 56. Lee, H. H. and Yang, J. W. A New Method to Control Electrolytes pH by Circulation System in Electrokinetic Soil Remediation. Journal of Hazardous Materials, 77(3) : 227~240, 2000.
 57. Wada, S. I. and Umegaki, Y. Major Ion and Electrical Potential Distribution in Soil Under Electrokinetic Remediation. Environmental Science and Technology, 35(11) : 2151~2155, 2001.
 58. Hamed, J. T., Acar, Y. B. and Gale, R. J. Pb(II) Removal from Kaolinite Using Electrokinetics. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 122(3): 241~271, 1991.
 59. Powell, R. M., Blowe, D. W., Fillham, R. W., Schultz, D., Divavec, T., Plus, R. W., Vogan, J. L., Powell, P. D., and Landis, R. Permeable Reactive Barrier

- Technologies for Contaminant Remediation. U.S. EPA EPA/600/R-98/125, 1998.
60. Acar, Y. B., Alshawabkeh, A. N. and Parker, R. A. Theoretical and Experimental Modeling of Multi-Species Transport in Soils Under Electric Fields, U. S. EPA Project Summary, EPA/600/SR-97/054, 1997.
 61. 洪肇嘉、吳惠銘、紀吉鴻、陳錕榮，電動法復育鎘、鉻、鉛污染土壤之研究，中華民國環境工程年會第十三屆廢棄物處理技術研討會，民國 87 年。
 62. 洪肇嘉、紀吉鴻，重金屬處理污染土壤之二維尺度研究，中華民國環境工程年會第十四屆廢棄物處理技術研討會，民國 88 年。
 63. 洪肇嘉、陳建忠、王銘鴻、楊宜霖，電動法附加水流去除鎘、鉻、鉛污染土壤之研究，中華民國環境工程年會第十三屆廢棄物處理技術研討會，1998。
 64. 張坤森，發展改良式電動力學技術整治鎘污染土壤之研究，中華民國環境工程年會第十三屆廢棄物處理技術研討會，民國 87 年。
 65. 張坤森、許博銘、張家豪、段繼梅，以改良式電動力技術整治桃園縣鎘、鉛污染土壤之研究，中華民國環境工程年會第十四屆廢棄物處理技術研討會，民國 88 年。
 66. 張坤森、鍾孟儒、吳坦璟、陳南蘋、呂易蒼，利用超音波及電動力技術促進鎘、鉛污染土壤整治之研究，中華民國環境工程年會第十五屆廢棄物處理技術研討會，民國 89 年。
 67. 張坤森、陳玉秋、陳雨楓、張怡頻、巫慧瑜、廖悅辰，觀音及蘆竹鎘、鉛污染土壤之整合式復育技術研究，中華民國環境工程年會第十六屆廢棄物處理技術研討會，民國 90 年。
 68. 張坤森、劉世樑、蔡品萱、黃振維、謝雅玲、楊弘傑，表面處理業重金屬污泥之電動力整治技術及成效評估研究，第二屆土壤及地下水處理技術研討會，民國 93 年。
 69. 黃嘉貞、薩支高，以電動法復育受鎘污染土壤之模場 2D 實驗，第十五屆廢棄物處理技術研討會，民國 89 年。
 70. 林世平、廖文彬、賴冠君、洪敬堯，改良電壓操作方式對電動力處理受污染底泥之影響，第二屆土壤及地下水處理技術研討會，民國 93 年。
 71. 章日行、唐政宏、黃明正、盧建宏、鍾秉倫，循環改良式電動力法復育鎘與鉛污染之土壤，第二屆土壤及地下水處理技術研討會，民國 93 年。
 72. Cunningham, S.D. and Berti, W.R. Remediation of Contaminated Soils with GreenPlants: An Overview, In Vitro Cell. Dev. Biol. Tissue Culture Association, 29: 207-212, 1993.
 73. USEPA, Phytoremediation of Groundwater at Air Force Plant 4 Carswell, Texas, EPA/540/R-03/506, 2003.
 74. Stomp, A.M. Genetic improvement of tree species for remediation of hazardous wastes: Vitro Cellular Development Biology, 29, 227-232, 1993.

75. USEPA, Recent developments for in-situ treatment of metal contaminated soils, contract number: 68-W5-0055, 1997.
76. Raskin, I. and others. Bioconcentration of Metals by Plants, Environmental Biotechnology, 5 : 285-290, 1994.
77. Kumar, P.B.A. and others. Phytoextraction : The Use of Plants to Remove Metals from Soils. Environmental Science & Technology. 29 : 1232-1238.,1995.
78. Baker, A.I.M. and Brooks, R.R. Terrestrial Higher Plants Which Hyperaccumulate Metallic Elements - A Review of Their Distribution, Ecology, and Phytochemistry, Biorecovery. 1: 81-126, 1989.
79. Salt, D. E., and others. A novel strategy for the removal of toxic metals from the Environment Using Plants. Biotechnology, 13 : 463-474, 1995.
80. AFCEETechnology Profile: Vacuum-Mediated LNAPL Free Product Recovery/Bioremediation (Bioslurper), 1994.
81. GWRTC, Bioslurping (TO-96-05), 1996.
82. NFESC Application Guide for Bioslurping Volume II Principles and Practices of Bioslurping (TM-2301-ENV), 1998.
83. Technology Application Analysis-Physical Separation and Acid Leaching : A Demonstration of Small-Arms Range Remediation at Fort Polk, Louisiana, June 3,1997.
84. A 場址土壤重金屬污染控制場址改善計畫整治完成報告書，民國 93 年 8 月。
85. B 場址土壤重金屬污染控制場址改善計畫整治完成報告書，民國 93 年 8 月。
86. Federal Remediation Technologies Roundtable, Abstracts of Remediation Case Studies, Volume 4, EPA 542-R-00-006, 2000.
87. Federal Remediation Technologies Roundtable, Abstracts of Remediation Case Studies, Volume 3, EPA 542-R-98-010, 1998.
88. 日本「環境管理」月刊第 39 卷第 8 期，ダイオキシン類汚染物の浄化事例，平成 15(2003)年 8 月。
89. 欣吳股份有限公司，彰化市某加油站場址控制計畫完成報告書，民國 92 年 6 月。
90. Federal Remediation Technologies Roundtable, Abstracts of Remediation Case Studies, Volume 5, EPA 542-R-01-008, 2001.

第六章 土壤及地下水污染整治工程實施程序

當充分瞭解土壤及地下水特定污染物的適用整治技術之後，未來整治工程實施的程序將包括進行整治技術可行性評估與選擇，慎選整治計畫規劃設計與施工承包廠商，同時需研擬並提送污染場址控制或整治計畫，以供相關環保機關審查。在污染場址整治完成後，相關環保機關將進行驗證作業的程序，以作為污染場址公告解除列管或需後續進行環境監測的依據。

6.1 整治技術可行性評估與選擇

一、整治技術選擇的目標

國內在訂定整治技術選擇的目標時可參考美國環境保護署(USEPA)在超級基金(Superfund)計畫的架構下，對於整治技術的選取訂定了以下基本的目標宣言^[1]：

「整治技術選取過程的目標是要選擇可以保護人類健康與環境，可長期維持該項保護，並將未處理之廢棄物質能降至最低的整治方案」。

而要達成此目標，所選取整治方案應能夠

- (一) 結合處理技術、工程控制及法令制度上的控管(如用水與行動限制等)以達成目標；
- (二) 在實際可行的前提下，首先處理場址所造成的主要威脅；
- (三) 當污染物難處理或技術不可行時，或需超出合理的處理期限經費時，能夠隔絕主要的威脅(隔絕有時比處理更實際)；
- (四) 對於次要低程度的威脅，首先考慮採取隔絕再用處理方案進行；
- (五) 當有創新技術得以提供對等或更好的處理效能、產生更低的負面衝擊或更低的建置成本時，應該考慮採用該類技術；
- (六) 在整治完成時，須對該場址進行復原工作(如道路、建築物、地下水等)。

歸納以上對於整治技術選取之目標與原則的描述，技術選取的考量應具備幾項因素要點：

- (一) 必須考量場址現況、水文地質及污染物特性，認定主要及次要威脅的程度。
- (二) 必須確認場址整治目標值，由法規的管制標準值或藉由健康風險評

估結果訂定。

(三) 必須實際可行及具備合理性的經費成本。

(四) 整治方案可能需要多種技術的整合或分階段式的進行。

(五) 應不斷思考採用創新技術的可能性。

二、整治技術選擇的流程

整治技術選擇前所需要的基本要件包括整治調查(remedial investigation, RI)與可行性評估(feasibility study, FS)，其流程與工作內容大致可歸納如圖 6-1 所示。整個過程包括整治調查與可行性評估等 2 種基本機制。整治調查乃在收集數據用以了解場址狀況、決定污染物的特性、評估污染對人體與環境造成之健康風險，以及用於執行處理能力測試估算處理技術的成效與費用。而可行性評估的部分則用於整治行動方案的開發、篩選與細部評估分析。實際應用上，RI 與 FS 階段的分野並不是如此清晰，因為兩者幾乎是同時進行，而且所得結果均有相互關係，並會影響最終的整治技術選擇。

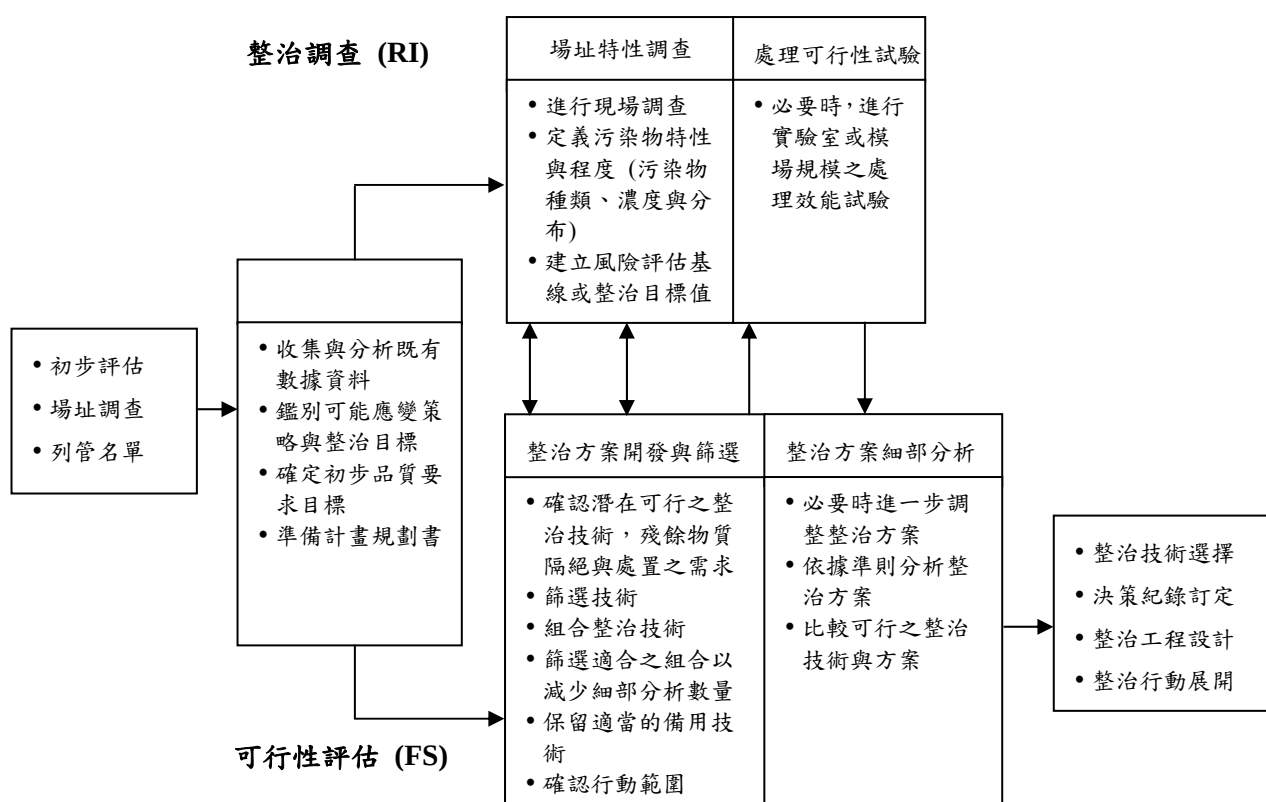


圖 6-1 整治調查與可行性評估的流程與工作內容^[2]

一個污染場址的公告是經過各個階段的調查與確認，環境場址評估(environmental site assessment, ESA)的初步調查與環境介質採樣分析，經過科學數據與制度法規的認定。因此在整治技術的選擇前，首先需要進行 RI/FS 範疇的定義，收集與分析以前調查的既有數據資料，鑑認可能應變的策略與整治行動的目標，確定初步品質要求的整治目標值，以及開始準備整治行動的計畫書。

整治調查(RI)中進行場址特性調查，是整治技術與整治方案篩選與規劃的基石。例如在土污法第 12 條與第 16 條，以及土壤與地下水污染整治法施行細則(以下簡稱施行細則)第 21 條中，均明訂整治計畫應根據場址調查評估結果擬訂之。此外在施行細則第 17 條中，在調查工作完成後 3 個月內，應提出相關之整治計畫。場址特性調查的工作包括依既有的資料進行更詳細且必要的現場採樣、檢測與數據分析，而且現場採樣可以分階段執行，以使調查工作成果可被用於微調整治計畫的範疇，並進一步使採樣分析能更切合需求。數據品質目標也可隨著調查工作的進行適切的修訂，藉以增加對場址的了解程度與降低調查所需時間與費用。傳統場址調查可以分階段進行採樣與檢測來達成調查之目的，但由現地工作至實驗室檢測結果的取得，通常需要數週時間，而當所得之分析結果不能滿足場址調查需求時，有可能需要再重行採樣。為能有效的降低場址特性調查的時間與費用，快速場址調查評估已逐漸成為趨勢^[3]，其中包括美國環保署積極推廣的三合系統(triad system)。三合系統是依環境整治效益決策所發展的系統，除了場址評估的整合系統性規劃與動態工作計畫(dynamic work plan)之外，更融入現地測試技術，以強化現場決策的規劃方法，其主要的精神是在最短的時間內，以最經濟的方式，得到符合品質要求的資料。當這些資料快速取得時，可明確定義污染物特性與程度，判斷污染物的種類、濃度與實際的分布。

此外，依據土污法第 17 條的規定，因地質條件、污染物特性或污染整治技術等因素，無法整治至污染物濃度低於地下水污染管制標準者，得依環境影響與健康風險評估結果，提出地下水污染整治目標，而主管機關亦積極推動以健康風險評估為基準的整治目標訂定指引。因此，場址調查所得的資訊除了可以支持並決定具備應用潛力的整治技術，同時也可以協助場址的健康風險評估工作之進行。藉由調查結果得以訂定風險評估之基線，以鑑別既有或潛在的風險，由於此項評估可以鑑別場址對於環境之主要威脅，因此也可以提供在可行性評估機制中，評估整治方案的成效。

可行性評估機制中整治方案的開發與篩選工作是在確認潛在可行之整治技術，以及判斷是否有殘餘物質與未處理廢棄物的隔絕與處置之需求，以技術之有效性、建置操作難易度與成本為基準篩選整治技術，同時依技術特性組合成為可用於場址的操作單元。整治技術可以依照污染介質(如地下水)、特定污染區域(如嚴重污染區塊)或整個場址做為規劃之依據。實務上，應該依照可能日後殘留污染物，需長期管理，以及未處理廢棄物需阻絕處置的條件，發展與考量多樣的整治方案，最高階的整治方案可以將場址整治到免除長期管理(包括監測)的必要性，最低階則可以僅涉及處理主要污染物(即針對場址所造成之主要環境威脅)的整治技術組合。

如果既有的場址特性、污染物特性與已知的處理技術不足以適當地評選整治技術時，則可能需要進行處理可行性試驗，以評估特定的整治技術。一般而言，處理可行性試驗可藉由實驗室規模試驗，收集到評估技術可行性所需的資訊，有時甚至需要進行模場規模試驗才能取得必要的效能資料與較佳之成本分析資訊，進而在詳細分析過程中得以選擇適合的整治技術。

一旦取得足夠的資訊，即可依據整治目標與法規要求等條件，針對不同整治技術或技術組合進行互相比較，此即為整治方案細部分析階段。在比較整治技術時，除考慮個別整治技術之優勢與缺點外，分析過程中亦應考慮場址本身限制所必須妥協之關鍵，而在技術層面與策略層面取得平衡。必要時，須依詳細分析結果進一步調整整治方案，最終分析結果將提供決策者選擇合乎法規與整治目的需求的適當整治技術。

三、整治技術選擇的步驟

在整治調查與可行性評估之後，將進行整治技術的選擇步驟，經過一連串討論與評估，訂定決策紀錄(record of decision)，之後進行整治工程設計，展開實際的整治工程。整治工程設計及整治工程進行期間均可對整治技術重新評估選擇，但篩選評估的過程均不能背離該遵守的原則。

(一) 篩選評估準則

整治技術方案篩選分析可依據效能評估、可履行性評估與成本評估 3 大項廣泛的基準進行。在進入細部分析的階段，整治技術可與特定考量準則及其個別的因素對比，例如美國環保署即列出 9 大準則^[4]做為對應的項目，其中包括：

1. 整體對人體健康與環境的保護；
2. 符合適用性或相關合理的要求(applicable or relevant and appropriate requirements, ARARs) (如法規要求)；
3. 長期整治成效與永久性；
4. 整治處理後能降低污染物之毒性、移動性與其體積；
5. 短期整治成效；
6. 可履行性；
7. 整治成本費用；
8. 主管機關接受程度；
9. 社區與民眾的接受度。

篩選時所採用的基準與上述 9 項準則之間的關係則可以進一步以圖 6-2 加以說明。因此進行整治技術選擇評估時，執行可行性評估的人應對於各項準則有相當程度的了解，才能在分析時確實掌握方向。整治技術抉擇的門檻因素包括必須能對人體健康與環境進行保護與符合適用性或相關合理的要求品質，以作為選擇的基本條件；第 3 項至第 7 項準則為主要衡量因素，作為權衡各項選擇的主要協調要素；而主管機關與民眾的接受度將作為選擇修正的因素，將參考公眾意見或有新資訊、新穎技術而變更。以下將繼續針對篩選評估的 3 大基準進行說明。

1. 效能評估

篩選評估的關鍵面向是各種整治技術在保護人體健康與環境的成效。每一項整治技術應該就其可達到之降低污染物毒性、移動性或體積成效加以評量，同時短期與長期效應均要被列入考量。所謂的短期效應是指工程營造與建置期間，而所謂的長期效應則是指整治行動完成之後的期間。至於污染物毒性、移動性或體積降低成效是指採用該項整治技術所能改變的有害污染物或受污染介質之特性以及所能降低與之相關的威脅或風險。

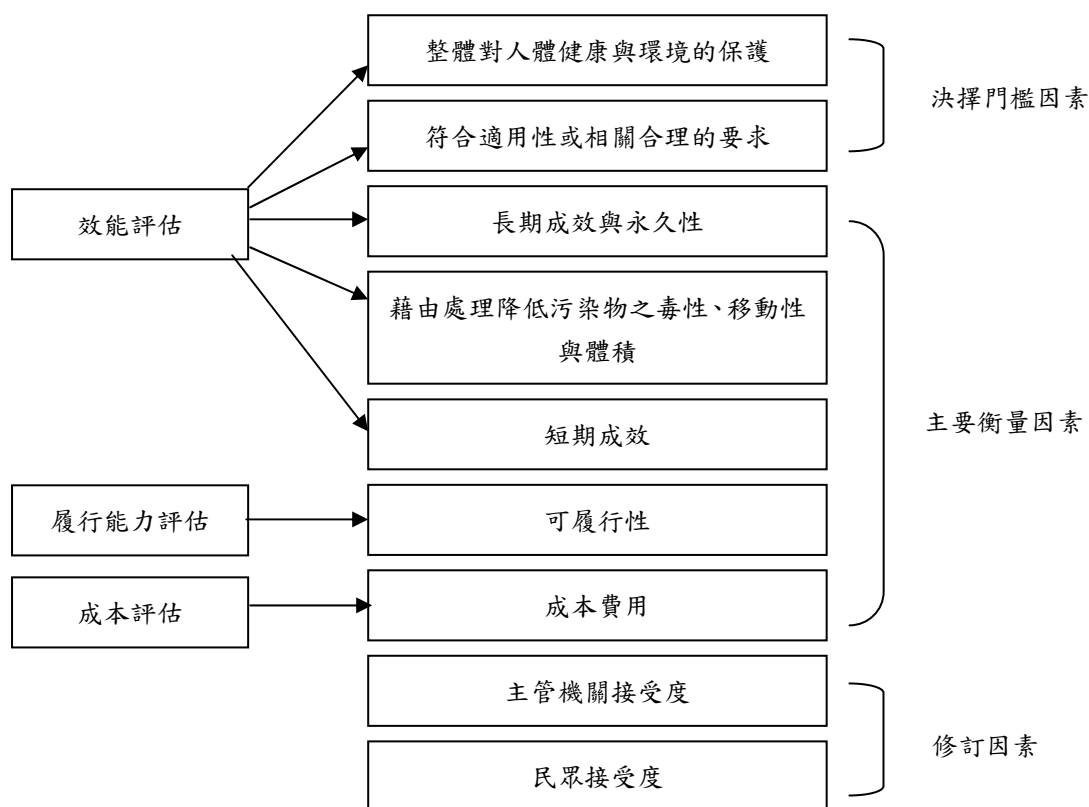


圖 6-2 初步篩選與細部分析準則間之關係 ^[2]

2. 履行能力評估

可履行性在評估過程中是用於評量特定場址條件下，適切之程序選項的組合，其包括建造、操作與維護整治行動的技術與行政之可行性評量。所謂技術可行性是指得以建造、穩定操作與符合技術專屬之程序規範(包括操作、維護、更換與監控整治技術的各項技術單元)。行政可行性則是指能取得其他主管單位許可的能力、整治技術的可取得性、具備後續需貯存或處置的容量，以及能獲得特殊設備與專家的需求。

當一項整治技術被認定不可行，通常在初步篩選即被排除，而不會被進一步的考慮。對行政可行性的負面影響因素，通常會涉及透過協調的方式來降低對整治技術之負面衝擊，但並不一定會將該項整治技術排除。

3. 成本評估

整治技術篩選另一項評估基準為成本評估，而評估的項目包括整治方案的規劃設計費、整治工程硬體設備費用、整治工程操作維護費（需考量稅率及通貨膨脹因素），以及後續週期性費用，如整

治設備的故障或更換、系統設備的拆解與場址的復原、應變計畫及後續監測計畫等。花費成本的因素將決定污染物的整治目標值，同時決定該技術是否具不實用性，但有時也會因場址關係人的財務狀況或場址的現值而改變整治成本評估結果。由於在篩選整治技術時所存在之各項因素數據的不確定性，一般而言在訂定決策記錄時，整治成本一般估算偏差會在-10%至+15%之間，屬於合理的範圍，而在整治行動時對成本的估算在細部分析下，其偏差範圍會擴大到-30%到+50%之間^[5]。成本評估過程中，應該納入敏感度分析，以確保掌握偏差範圍，而敏感度分析項目應包括整治行動的有效期限、操作維護費用、整治期間的時程、場址的特性（如污染物數量）及通貨膨脹等因素。場址整治計畫的基本資料可利用美國發展的歷史費用分析系統(historical cost analysis system, HCAS)輸入，該系統同時能將整治工作區分結構(work breakdown structure, WBS)逐一分項進行費用分類，方便整體成本費用的估算。而一般實際經驗各項整治技術的花費可參考美國環保署整理的資料庫 Vendor Information System for Innovative Treatment Technologies (VISITT) database^[6]，該資料庫 6.0 版中含括 204 個廠商資料及 325 個新穎處理技術的使用，廣為跨國際人士所使用，資料庫中針對整治計畫的經驗、費用進行列舉說明；而對於較特定技術的單價則可參考美國環保署的文獻^[7]。在經過成分的細部分析後，整治技術方可作為整治方案的選擇。

(二) 篩選考量要項

整治技術的選擇除了依據以上的準則評估外，亦需考量以下特定的要項：

1. 考量因子包括主要及次要威脅污染物的特性與污染程度，受污染介質的種類與體積數量，以及場址的現狀，如建築物及道路等與土地使用型態，場址區域地理環境及氣象等因素。
2. 污染處理所使用的方式包括現地處理、現場處理、離場處理模式，有些處理技術僅適用於特定模式，而並不適用於其他。
3. 部分次要威脅低程度污染物有時可使用隔絕方法，避免污染的傳輸，同時隔絕亦可減少整治工程直接處理所需的耗費，而處理所剩下的殘餘物與未處理的廢棄物質或許有處置的必要性，其運送距離與方法皆列為評估項目。

4. 整治工程期間所產生的空氣污染排放，以及設備尾氣處理之必要性皆列為評估的要項，其不僅牽涉到人體的健康風險問題，同時也影響整治技術的成本考量。
5. 技術執行的困難度與達成整治目標所需時程的評估，整治的時程可能受整治技術之限制，如設備大小與處理量、最大處理成效以及處理系統的取得難易度所影響。
6. 法令許可及其所產生的限制，諸如整治程序的尾氣處理所可能需要的排放許可，以及產生的廢水排放至工業區綜合污水處理廠的污染物(如化學需氧量)總量限制問題，均屬於此類的考量因素。

(三) 整治技術組合之可行性

當個別整治技術經過 RI/FS 的篩選，及利用上述基準與考量要項的評估後，認定場址污染整治方案或許需要使用多項技術結合成為整治列車，在同時或分階段執行整治工作。然而並非所有整治技術都適合或適用於整治列車中，例如整治技術中使用的電動力法可涵蓋於整治列車中，但具有可獨立操作的特質之植生復育及固化/穩定化技術則不必要具備於整治技術組合中。美國政府機關所組合的單位 The Federal Remediation Technologies Roundtable (FRTR)^[8] 曾探討並結論出現地及非現地整治技術篩選的結果並做成資料矩陣，針對不同污染物質特性，將可能使用的整治技術除了依發展應用的狀況、殘餘物產生的可能性、硬體經費或操作維護費較著重的狀況、目前已可利用性、系統操作維護的可靠性、整治所需時間、整體費用進行評價區分等級，此外亦將個別整治技術列為整治列車組合的可能性明確定義說明。因此由各項整治技術如何結合成為整治列車，考量的因素如下所列：

1. 整治技術的獨立性。
2. 整治技術結合時連結介面的可靠性。
3. 各項整治技術的互補性，用以處理不同污染物。
4. 是否減少殘餘物質與未處理廢棄物質數量。
5. 整治技術結合時是否更容易操作與維護。
6. 整治技術結合時是否更容易達成整治目標。
7. 結合後是否可節省經費與時程。

6.2 控制與整治計畫研擬

一、法令依據

依據土污法第 11 條之規定^[9]，在主管機關對於有土壤與地下水污染之虞的場址進行調查評估後，如發現污染物濃度超過污染管制標準，則該場址將被公告為「控制場址」，另若經過初步評估程序，確對國民健康及環境造成威脅時，則可報請中央主管機關審核，公告為「整治場址」。依實際需要，主管機關得命污染行為人提出控制計畫。

另依土污法中第 16 條之規定，污染行為人在場址公告為整治場址後，應依據場址調查評估結果（土污法第 12 條），訂定土壤與地下水整治計畫，並經主管機關審查核定後，據以實施。

二、控制計畫的研擬

土壤與地下水污染控制或整治計畫的內容，分別於施行細則^[10]第 14 條與第 21 條中有明確之規範，其應包含之事項如表 6-1 所列。

表 6-1 土壤與地下水污染控制計畫與整治計畫之內容

事項	控制計畫	整治計畫
計畫提出者、撰寫者及執行者資料	✓	✓
計畫大綱		✓
場址基本資料	✓	✓
場址現況及污染情形	✓	✓
污染物、污染範圍及污染程度	✓	✓
整治基準或整治目標		✓
污染控制及防治方法	✓	
整治方法		✓
污染監測方式 (計畫)	✓	✓
污染防治計劃		✓
工地安全衛生管理 (計畫)	✓	✓
控制結果之驗證方式	✓	
整治完成之驗證計畫		✓
整治經費預估		✓
計畫執行期程	✓	✓
其他經主管機關指定之事項	✓	✓

於 93 年 8 月環保署分別公布「土壤及地下水污染控制計畫撰寫指引」與「土壤及地下水污染整治計畫撰寫指引」，進一步將相關計畫書之研擬以及應包括之內容提供明確的準則。

下就污染控制計畫相關之研擬內容說明之：

(一) 計畫提出者、撰寫者及執行者資料

計畫提出者可為控制場址污染行為人、所在地主管機關、計畫實施者為或法人提出者。惟若由法人為計畫提出者則應提供法人、負責人及專案經理人之資料。計畫撰寫者為計畫提出者或委由他人(如技師事務所、顧問公司、工程公司等)負責撰寫。計畫執行者同樣可由計畫提出者自行執行或委由他人(技師事務所、顧問公司、工程公司及其他國內外相關單位或機構)執行。惟不論是撰寫或執行是委由他人負責者，均應提出與執行人之委辦證明文件及其相關資料(公司證照、負責人資料、營業項目、相關經驗與實績等)。

(二) 場址基本資料

場址基本資料應包括場址公告資料、場址名稱及地址、地號或位置、污染行為人資料以及場址配置。其次應詳細說明目前之營運狀況，諸如潛在產生污染之製程、原物料、產品與廢棄物等均需對其生命週期循環提供正確的資訊，亦有利於場址污染源的判別。

此外，應提供場址相關之歷史資料，包括場址沿革與歷史調查資料等。依照撰寫指引的要求，歷史資料的回溯期間至少 10 年。特別是過去曾發生之緊急應變事件、調查與監測資料與違反環保法規之事件。若因人事變動或相關資料未能符合回溯期間之需求，可以採用訪談久任人員的方式，補充相關資料不足之處。

(三) 場址現況及污染情形

相對於場址歷史資訊的說明，於此應先針對場址之現有條件加以說明，說明內容至少應包括地理條件、地質條件、氣象條件、水文與水質狀況的描述，以及週界環境敏感受體的鑑別與分析，並對目前之污染情形簡要說明，此項資料應能顯現場址的特性為重點。

(四) 污染物、污染範圍及污染程度

本項應針對污染的狀況進行詳盡的描述，重點包括關切污染物及其特性與污染範圍及污染程度。利用場址調查結果(歷史數據與補充調查)說明污染的狀況(污染範圍與污染源)。同時，依據污染

物特性及場址特徵，說明土壤系統及地下水系統的污染情形及污染物的行為。以土壤系統而言，應分為土壤及土壤氣體兩部分說明，地下水系統應分為溶解相、污染源以及自由相(若存在)說明。接著整合土壤與地下水系統資訊，進行推估分析(如利用數值模式)，藉以描繪出污染範圍與可能的擴散狀況。

(五) 污染控制及防治方法

應分別說明土壤污染及地下水污染的污染控制及防治方法。污染控制所採取之處理技術，若無場址先導試驗資料可佐證，至少應採擷國內外相關實場、模場文獻資料評估說明處理效率等技術的可行性。

污染控制及防治方法說明內容應包括：

1. 控制方法說明。
2. 控制方法細部規劃。
3. 控制方法的經費預估。
4. 污染防治計畫。

同時對於控制計畫執行期間的二次污染控制與預防措施之規劃應一併考量，以防範場址在控制計畫執行期間對環境造成負面之影響。

(六) 污染監測方式

監測計畫應包括場址污染監測計畫與場址周圍環境監測計畫，前者為針對場址內土壤與地下水之監測計畫，後者則為場址邊界外的監測計畫(如場址放流水質、地表水質、空氣品質、施工噪音與振動等)。此外，監測計畫亦需注意控制方案所需之設備、儀器、機械、材料及相關設施等，在運作期間，可能對污染場址及其周圍環境生態所產生的影響。

另外，監測計畫內容應說明監測點數目及其相關位置、環境監測類別、採樣頻率、樣品採樣方法、檢測方法與程序、品保品管及樣品運送程序等，而監測檢驗測定均應依土污法第 10 條及相關規定辦理。

(七) 工地安全衛生管理

控制計畫執行期間應依「勞工安全衛生法」等相關規定訂定工地安全衛生計畫，擬定安全衛生工作守則，詳列安全衛生注意事

項、實施作業環境測定，並防範人為意外與災害發生及對於緊急事故之應變措施等。此外，應妥慎規劃有關人員參觀之安全及場址保全工作。

(八) 控制結果的驗證方式

控制結果的驗證方式是為驗證控制過程是否依據控制計畫內容所訂定各階段期程執行及場址污染物濃度是否達到控制計畫之目標。驗證事項之查核方法是由控制計畫實施單位提出，經監督小組審查同意後執行。監督小組亦得提出相關、合適之查核方法，以補不足之處。所應提出驗證內容至少應說明：

1. 驗證單位
2. 關切污染物之控制計畫目標
3. 各階段之驗證項目與方法

相關之驗證作業程序之詳細說明，請見 6.3 節。

(九) 計畫執行期程

控制計畫期程的規劃，應說明控制計畫設計與執行所需時間、達到計畫目標之期程以及實際操作與運作時間。同時應設定計畫執行期間之里程碑，以利進度查核。

三、整治計畫的研擬

由表 6.2-1 可見，污染整治計畫書的內容與污染控制計畫書有多項相同或類似之項目，同時規範整治目標、整治方法與整治成效等整治計畫核心項目，例如整治目標即為整治技術篩選的重要準則(見 6.1 節)。以下即就污染整治計畫相關之研擬內容加以說明。

(一) 計畫提出者、撰寫者及執行者資料

計畫提出者可為整治場址污染行為人、所在地主管機關、計畫實施者為或法人提出者。惟若由法人為計畫提出者則應提供法人、負責人及專案經理人之資料。計畫撰寫者為計畫提出者或委由他人(如技師事務所、顧問公司、工程公司等)負責撰寫。計畫執行者同樣可由計畫提出者自行執行或委由他人(技師事務所、顧問公司、工程公司及其他國內外相關單位或機構)執行。惟不論是撰寫或執行是委由他人負責者，均應提出與執行人之委辦證明文件及其相關資料(公司證照、負責人資料、營業項目、相關經驗與實績等)。

(二) 計畫大綱

計畫大綱是針對整治計畫書之內容進行摘要性的描述，主要應擷取的內容包括：

1. 場址名稱及地址、地號或位置
2. 污染物及污染情形
3. 污染物整治基準或整治目標
4. 整治方法概述
5. 整治計畫期程

(三) 場址基本資料

場址基本資料應包括場址公告資料、場址名稱及地址、地號或位置、污染行為人資料以及場址配置。其次應詳細說明目前之營運狀況，諸如潛在產生污染之製程、原物料、產品與廢棄物等均需對其生命週期循環提供正確的資訊，亦有利於場址污染源的判別。

此外，應提供場址相關之歷史資料，包括場址沿革與歷史調查資料等。依照撰寫指引的要求，歷史資料的回溯期間至少 10 年。特別是過去曾發生之緊急應變事件、調查與監測資料與違反環保法規之事件。若因人事變動或相關資料未能符合回溯期間之需求，可以採用訪談久任人員的方式，補充相關資料不足之處。

(四) 場址現況及污染情形

相對於場址歷史資訊的說明，於此應先針對場址之現有條件加以說明，說明內容至少應包括地理條件、地質條件、氣象條件、水文與水質狀況的描述，以及週界環境敏感受體的鑑別與分析，並對目前之污染情形簡要說明，此項資料應能顯現場址的特性為重點。

(五) 污染物、污染範圍及污染程度

本項應針對污染的狀況進行詳盡的描述，重點包括關切污染物及其特性與污染範圍及污染程度。利用場址調查結果(歷史數據與補充調查)說明污染的狀況(污染範圍與污染源)。同時，依據污染物特性及場址特徵，說明土壤系統及地下水系統的污染情形及污染物的行為。以土壤系統而言，應分為土壤及土壤氣體兩部分說明，地下水系統應分為溶解相、污染源以及自由相(若存在)說明。接著整合土壤與地下水系統資訊，進行推估分析(如利用數值模式)，藉

以描繪出污染範圍與可能的擴散狀況。

(六) 整治基準或整治目標

此項內容應包括以下各子項之說明：

1. 整治基準或整治目標
2. 整治基準或整治目標之研擬說明，必要時可以採用風險評估的研擬方式

(七) 整治方法

整治方法的說明應針對整治技術與實際場址特性之相容性與可行性(處理技術若無場址先導試驗資料可佐證，至少應採擷國內外相關實場、模場文獻資料評估說明處理效率等技術的可行性)。當提出人為污染行為人或污染土地關係人時，其說明項目應包括：

1. 整治篩選方法說明
2. 整治方法細部規劃

若整治計畫是由所在地主管機關提出時，其說明項目應包括：

1. 整治方法篩選比較並經過評估標準或準則之分析以選擇最佳場址整治方案
2. 最佳整治方案的結論與細部設計規劃

如遇特殊情況導致無法進行模場試驗或需更詳細資料時，造成無法辦理整治方法細部規劃或決定整治方法時，可說明理由，經主管機關同意後，另定期提出整治方法細部規劃。

(八) 污染監測計畫

監測計畫應包括場址污染監測計畫與場址周圍環境監測計畫，前者為針對場址內土壤與地下水之監測計畫，後者則為場址邊界外的監測計畫(如場址放流水質、地表水質、空氣品質、施工噪音與振動等)。此外，監測計畫亦需注意控制方案所需之設備、儀器、機械、材料及相關設施等，在運作期間，可能對污染場址及其周圍環境生態所產生的影響。

另外，監測計畫內容應說明監測點數目及其相關位置、環境監測類別、採樣頻率、樣品採樣方法、檢測方法與程序、品保品管及樣品運送程序等，而監測檢驗測定均應依土污法第 10 條及相關規

定辦理。

(九) 污染防治計畫

應說明整治計畫執行期間對空氣污染、水污染、噪音與振動或其他污染等問題所實施之預防措施，以防範污染場址在整治期間因整治工程而造成二次污染與對環境之傷害。

(十) 場址安全衛生計畫

整治計畫執行期間應依「勞工安全衛生法」等相關規定訂定工地安全衛生計畫，擬定安全衛生工作守則，詳列安全衛生注意事項、實施作業環境測定，並防範人為意外與災害發生及對於緊急事故之應變措施等。此外，應妥慎規劃有關人員參觀之安全及場址保全工作。

(十一) 整治完成之驗證計畫

整治結果之驗證方式是為驗證整治過程是否依據整治計畫內容所訂定各階段期程執行，以及場址污染物濃度是否達到整治計畫之目標。驗證事項之查核方法是由整治計畫實施單位提出，由監督小組審查同意後執行。監督小組亦得提出相關、合適之查核方法以補不足之處。所應提出驗證內容至少應說明：

1. 驗證單位
2. 標的污染物之整治計畫目標
3. 各階段之驗證項目與方法

相關之驗證作業程序之詳細說明，請見 6.3 節。

驗證程序同時應說明為整體驗收或分階段驗收，並提出驗證事項及驗證方法。驗證項目與方法則應區分為土壤污染、地下水污染。

(十二) 整治經費預估

除了應推估整治方案所需總金額、每年操作維護(O&M)費用及目前總價值、折舊率(標準折舊率 7 %)等，說明整治年限中所需之經費。此外亦須說明整治經費來源，且若為使用土壤及地下水污染整治基金者，則應說明預估整治經費。

(十三) 整治期程

整治計畫期程的規劃，應說明整治計畫設計與執行所需時間、

達到計畫目標之期程以及實際操作與運作時間，同時應設定計畫執行期間之里程碑以利進度查核。

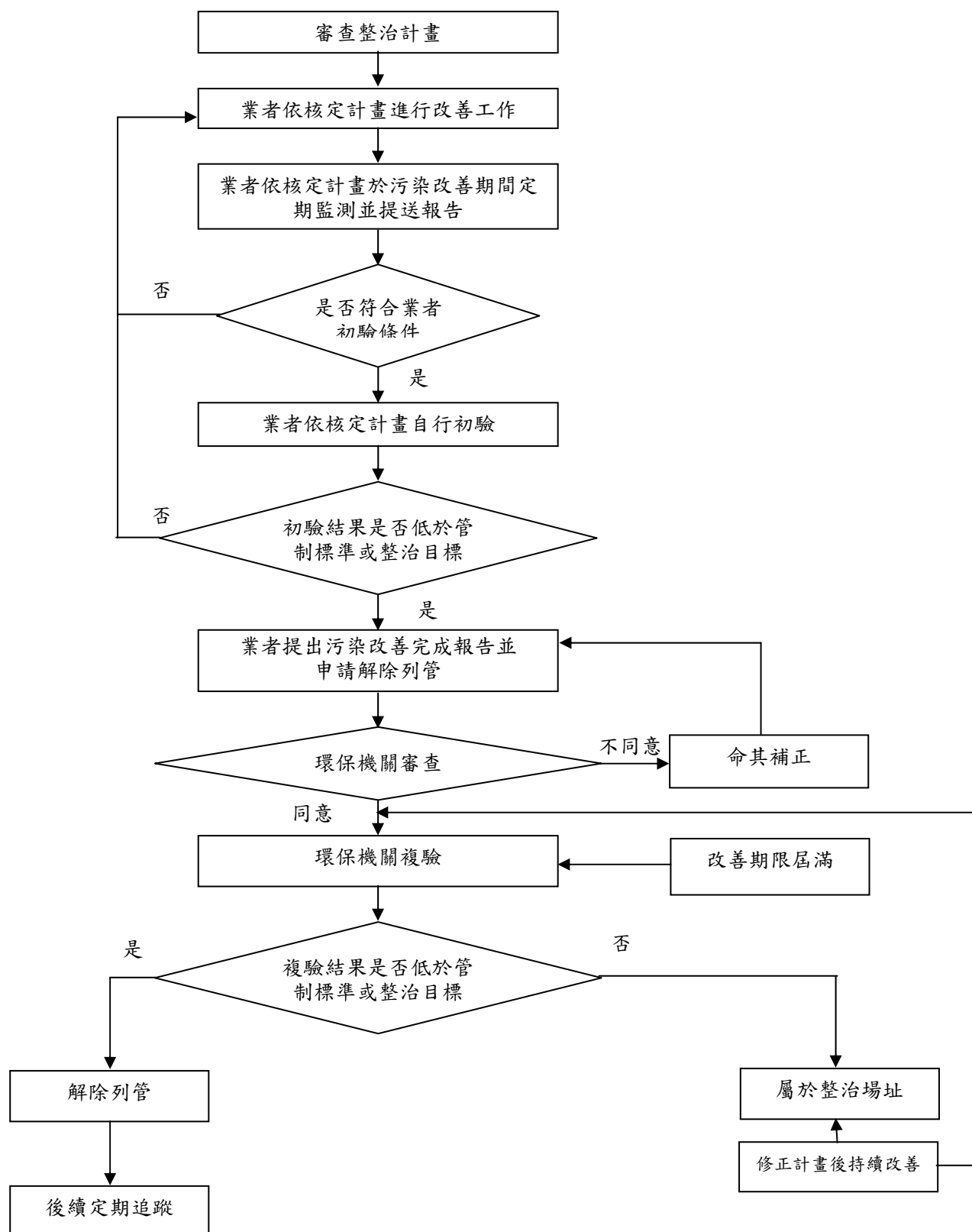
有關污染控制計畫與污染整治計畫研擬的進一步說明，建議可參考環保署相關之撰寫指引^{[11][12]}。

6.3 環保機關控制與整治計畫審查與驗證作業程序

環保機關於業者提出污染控制或污染整治計畫時，針對場址調查結果與改善方法的合理性與可行性進行審查，同時依據污染控制計畫撰寫指引與污染整治計畫撰寫指引之內容，審查其中污染改善完成之驗證計畫或方式之完整性。相關的驗證作業流程如圖 6-3 所示。

原則上，驗證計畫是併同污染控制與污染整治計畫審查，而控制計畫或整治計畫經過主管機關審查核定之後，業者即可進行改善或整治工程的進行，並定期提供監測資料，監測頻率一般可為月報或季報的方式訂定之，監測項目則應以污染控制與污染整治計畫中所定之標的污染物為主。

業者在進行初驗之前應在改善期間至少有 3 次的監測結果低於管制標準或整治目標方可符合初驗的條件，且每次的間隔至少要達 1 個月以上，以確認污染物沒有濃度回升(rebound)的狀況。如果初驗結果合格，即可提出污染改善完成報告，申請解除列管。經主管機關或審查小組核定後，且通過複驗之機制，即完成驗證之程序。惟當複驗結果未能符合管制標準或整治目標的要求時，則需持續進行改善。倘若為控制場址，則將再次進行初評，並依現況判定應以污染場址或控制場址予以列管。

圖 6-3 污染改善完成驗證作業流程^[13]

6.4 整治施工承包商評估及選擇

一、考量重點

整治工程規劃設計與建置規模取決於所需執行之調查工作與採用之整治工法而有相當程度的差異，同時依據所訂定之整治目標，所承擔之風險亦有不同的，因此在評估施工承包商的過程應著重於經濟面、技術面、工程品質與風險承擔能力。以下有關承包商之評估與選擇方法，主要是參考美國專案管理學會之專案管理指引^[14]。

二、承包商的選擇

在選擇承包商的流程之中，除了最基本的成本或價格之外，還應需要評估下列可能因素：

- (一) 雖然價格是重要考量，但即時交付成品的能力同樣會影響成本，如果事實上承包商無法及時交付產品，其所涉及之內部與外部失敗成本應被納入考量，而所建議的最低價格就未必是最低成本。
- (二) 建議書為評估承包商的重要依據，其內容往往分成技術面(方法)與商業面(價格)二大部分，二者應該單獨評估。
- (三) 關鍵產品或關鍵技術的提供能力。
- (四) 可依據初步建議書篩選合格的承包商，然後再以更詳盡與更全面的建議書進行評估。

至於選擇與評估承包商的主要依據包括：

- (一) 計畫建議書的品質。
- (二) 承包商過所提供之服務的樣品或案例，以此做為評估其能力與產品品質。另可審查承包商組織過去來往的歷史紀錄。
- (三) 選擇評估要件用於評定承包商之建議，並可以量化之標準予以評分，而常用的要件包括對於整治工程之需求的了解、總成本或生命週期、技術能力、計畫管理能力與財物實力等。
- (四) 企業組織的策略往往也會影響評估的思維。

於選擇承包商時可以採用的工具與技巧亦相當多元，例如透過合約協商的方式清楚規範責任與權限、適用的條款與法律、技術和經營管理方法以及價格等。為能進一步量化評估的數據，可以採用加權系統，突顯真正重要之考量因素，並減少個人偏見影響對承包商的選擇。

建構篩選系統主要是透過對於評估要件設定最低的需求，發揮初步篩選的功能，例如於邀標書中設定計畫參與人員資格、承包商之資本額、保險要求等。在成本估算上，可以於內部制定獨力估算的能力，並依承包商之工作說明書進行獨立估算，若與承包商之落差過大，即可顯示工作明書不夠明確或是在工作內容期望上有所誤解，可以即早對於價格進行協商，依照其特質，此獨立估算的價格可稱為合理成本預估值。在確定所選擇承包商後，即應透過合約管理(合約泛指合約、協議書、採購單或備忘錄等)，讓雙方的共識落實於法律層面，透過合約方能建立雙方之法律關係，並以文件保證承包商之服務能夠滿足已經辨識之需求。

除了以上一般性的考量之外，針對整治技術篩選與方案的擬定過程，各階段亦有其較特殊之因素(如法規需求、技術條件等)，可以在承包商的評估程序中一併納入，茲於表 6-2 中列出部分的因子作為參考。

表 6-2 承包商選擇之特殊考量因子範例

整治技術/方案工作階段	特定考量因素
定義 RI/FS 的範疇	• 專業人員之廣度 • 對於法規之熟悉程度 • 風險鑑別與管理策略之成熟度
場址特性調查	• 土壤與地下水採樣認證 • 土壤與地下水分析認證 • 評估人員資格專業證明 • 對品保/品管的認知與負責態度
整治技術開發與篩選	• 相關整治技術的建置經驗 • 整治技術之掌握度 • 具備修改技術與工程建置之能力 • 技術研究與開發之能力
可處理性測試	• 實驗室規模驗證能力 • 模場建置之能力與經驗
整治技術細部分析	• 所掌握之核心技術的多元性 • 整治技術整合能力 • 對於整治目標達成之承諾度
整治行動階段	• 具備類似整治計畫經驗 • 具有整治技術與設備 • 具備計畫執行的熱誠度、配合度與承諾度

參考文獻

1. USEPA, Rules of Thumb for Superfund Remedy Selection, Office of Solid Waste and Emergency Response, EPA 540-R-97-013, 1997.
2. USEPA, Guidance for Conducting Remedial Investigations and Feasibility Studies Under CERCLA, EPA/540/G-89/004, OSWER Directive 9355.3-01, 1988.
3. USEPA, Expedited Site Assessment Tools For Underground Storage Tank Sites - A Guide For Regulators, EPA 510-9-97-001, United States Environmental Protection Agency, Washington DC, USA, 1997.
4. USEPA, A Guide to Selection of Superfund Remedial Actions, Office of Solid Waste and Emergency Response, 9355.0-27FS, 1990.
5. US Army Corps of Engineers, A Guide to Preparing and Reviewing Remedial Action Reports of Cost and Performance, EP 1110-1-19, 2001.
6. USEPA, Vendor Information System for Innovative Treatment Technologies (VISITT) database, Technology Innovative Office.
7. USEPA, The Guide to Documenting and Managing Cost and Performance Information for Remediation Projects, EPA 542-B-98-007, 1998.
8. The Federal Remediation Technologies Roundtable (FRTR), The Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, Version 3, 1997.
9. 行政院環境保護署，土壤及地下水污染整治法，民國 92 年 1 月。
10. 行政院環境保護署，土壤及地下水污染整治法施行細則，民國 90 年 10 月。
11. 行政院環境保護署，土壤及地下水污染控制計畫撰寫指引，民國 93 年 8 月。
12. 行政院環境保護署，土壤及地下水污染整治計畫撰寫指引，民國 93 年 8 月。
13. 行政院環境保護署，油品類儲槽系統污染改善完成驗證參考作業手冊，民國 95 年 5 月。
14. PMI, Project Management Body of Knowledge-2000 Edition, Project Management Institute, Newtown Square, PA 19073-3299 USA, 2000.

第七章 土污法對產業影響及因應對策

本章將說明土污法中有關整治費徵收、工廠土地移轉、設立、停業或歇業之土壤污染檢測規定、土壤或地下水污染場址之列管作業程序，以及土污法相關訴願程序或行政訴訟等，以業者之角度，提出當事業被通知查證、被通知改善、被列為控制、整治場址，或進行土地移轉、設立、停業、歇業時，於各種適法狀況下之因應對策，供產業界人士參考使用。

7.1 土壤及地下水污染整治費之徵收

土污法第 22 條之規定：「中央主管機關為整治土壤、地下水污染，得對指定公告之化學物質，依其產生量及輸入量，向製造者及輸入者徵收土壤及地下水污染整治費」。據此，環保署遂依據法律之授權，公告「土壤及地下水污染整治費收費辦法」（以下簡稱收費辦法）及「土壤及地下水污染整治費徵收種類與收費費率」，並自 90 年 11 月 1 日起施行。

土壤及地下水污染整治費申報作業相關說明如下：

一、徵收對象

整治費收費對象為環保署指定公告之 6 類 125 種化學物質，包括 51 種石油系有機物、33 種含氯碳氫化合物、17 種非石油系有機化合物、2 種農藥類安殺番及苯甲氯、20 種重金屬及重金屬化合物及其他類 2 種氰化鈉及氰化鉀等之製造或輸入者。

二、整治費費率

請至行政院環保署土壤及地下水污染整治基金會(以下簡稱土基會)網站(網址：<http://ww2.epa.gov.tw/SoilGW/index.asp>)查詢。

三、整治費繳納

整治費採按季徵收，徵收對象每年 1 月、4 月、7 月及 10 月底前自行申報繳納前季整治費，每季申報時依規定格式填具土壤及地下水污染整治費申報書、化學物質產生量與整治費申報明細(只輸入未產製之業者免填)或(及)化學物質輸入量與整治費申報明細，連同化學物質產生量統計報表或化學物質進口報單及繳費收據影本，寄至土基會。或於每季徵收期限之當月(例如 4 月 1 日至 4 月 30 日申報 1 月至 3 月之整治費)經由網路申報，網址為 <http://soilweb.utrust.com.tw/>，再將繳費收據影本及產製報表(僅輸入者免附)寄至土基會。

四、整治費計算

$$\begin{aligned}\text{整治費費額} &= \Sigma[\text{當季個別化學物質應繳納整治費費額(元)}] \\ &= \Sigma[\text{化學物質產生量或輸入量(公噸)} \times \text{費率(元/公噸)} \times \\ &\quad (1 - \text{免徵比例})]\end{aligned}$$

若繳費人未於期限內繳納費用，應依土污法第 33 條及收費辦法第 13 條規定加計利息。

五、整治費繳納方式

應繳納整治費金額由繳費人自行計算，並至金融機構以匯款方式繳費，匯入中央銀行國庫局。每季正常申報之 1 筆手續費(金融機構所稱手續費包括手續費與金資中心應付帳款兩部份)採內含方式(內含於應繳整治費內)，繳費義務人需先向銀行詢問手續費後，將應繳納整治費扣除手續費金額填入匯出匯款金額欄位。亦即每季由環保署僅負擔 1 筆手續費，第 2 筆以上(例如原繳款金額不足，再匯 1 次或補繳整治費等)之匯款手續費由繳費人負擔。繳款人將繳費收據影本與申報資料一併寄至環保署申報，繳費收據正本留存做為列報費用之用。

六、整治費申報

(一) 免徵比例之申請

對指定公告化學物質之產製者，依據收費辦法第 6 條規定，繳費人得檢具應徵收整治費化學物質之產製原料及製程內容說明，詳列直接產製原料已繳納整治費之成本百分比，連同免徵比例申請書及繳費收據與直接產製原料已繳納整治費證明書向環保署申請核定免徵比例。免徵比例經核定後，若製程及物種費率未更改，可繼續沿用。

(二) 出口退費申請

依收費辦法第 9 條，已繳納整治費之化學物質於出口時，其繳費人得依當季實際出口數量，檢具出口報單及該化學物質已繳納整治費單據，向環保署申請退還其已繳納整治費費額之 95%，並得充作其後應繳納費額之一部分。

若出口化學物質適用經核定之免徵比例扣抵整治費者，其直接產製原料繳納之整治費得併入其已繳納整治費費額計算出口退費。

申請出口退費者，若直接產製原料向已繳納整治費之業者購

買，出口業者應提出整治費轉嫁證明；無法提出轉嫁證明，則依出口業者實際繳納之整治費費額計算出口退費。

(三) 溢繳退費申請

依收費辦法第 4 條，溢繳者，充作其後應繳費額之一部分。依收費辦法第 8 條，繳費人歇業、停業或停止中央主管機關指定公告化學物質之製造或輸入者，應自事實發生之日起 30 日內檢具其應繳納整治費之結算資料，並檢附環保署核發之溢繳通知，向環保署申請停止徵收並退還溢繳之費額。

(四) 整治費繳費結算不足之催繳

依收費辦法第 4 條，經中央主管機關審查，其結算不足者，應於次季補足其差額。

(五) 逾期未申報之催告

為恪盡事業之環境與社會責任，逾期未申報整治費時，請事業單位收到催告通知時，儘速繳費申報(逾期者依土污法第 33 條及收費辦法第 13 條論處)。

(六) 投保環境損害責任險或等同效益之保險者年度退費申請

依收費辦法第 10 條，繳費人投保環境損害責任險或等同效益保險，得以會計年度為計算單元，填具退費申請書，於每年 6 月 1 日起至 7 月 31 日止，檢具保險契約書及前一年度保險費繳費單據，向環保署提出申請；經審查核定者，其退費金額，以其前一年度實際繳納整治費費額之 5% 為上限，並得充作其後應繳納費額之一部分。

(七) 新投資於預防土壤及地下水污染有直接效益之設備或工程年度退費申請

依收費辦法第 11 條，繳費人新投資於預防土壤、地下水污染有直接效益之設備或工程所支出費用，得以會計年度為計算單元，填具退費申請書於每年 6 月 1 日起至 7 月 31 日止，檢具相關投資內容說明及前一年度費用支出證明文件，向環保署提出申請。其退費金額，以其前一年度實際繳納整治費費額之 20% 為上限，並得充作其後應繳納費額之一部分。符合新投資於預防土壤、地下水污染有直接效益之設備或工程項目如表 7-1 所示。

**表 7-1 符合土污法第 11 條第 1 項之新投資於預防土壤、地下水污染
有直接效益之設備或工程項目**

工程項目	細項分類
一、儲槽區、加油站之洩漏預防	(一) 儲槽本體及儲槽區以塑脂塗裝及包覆、鋪設防漏材質、陰極防蝕處理，以達到預防洩漏之目的，相關材料費及施工工程費。 (二) 攔污設施。 (三) 擋油堤。
二、置放區地面阻絕設施	(一) 攔污設施及油水分離設施。 (二) 水溝開欄。
三、廢水、廢液處理設施	(一) 輸送管線之防漏設施(例如：管溝增設鋼筋混凝土護槽、防溢堤)。 (二) 處理設施之防漏設備部分(例如：內部包覆、鋪設相關特殊材質等)。
四、廢棄物、污泥、廢水及廢液之儲存設施	(一) 廢水槽防漏設備部分(例如：內部包覆、鋪設相關特殊材質等)。 (二) 攔污設施。
五、金屬粉塵逸散預防	粉塵收集系統。
六、其它	前述所列 5 項之細項分類以外，符合收費辦法第 11 條規定之工程。

(八) 免繳納整治費之情形

依據收費辦法第 12 條，繳費人有下列情形之一者，得免繳納整治費：

1. 進口指定公告之化學物質，未經加工即轉口輸出，且未辦理通關手續者。
2. 進口指定公告之化學物質屬廣告品或貨樣者。
3. 當季應繳納整治費費額，未達新台幣一百元者。
4. 其他經中央主管機關指定公告者。

7.2 工廠土地移轉、設立、停業或歇業之土壤污染檢測規定

鋼鐵冶鍊業之廠房、其他附屬設施所在之土地及空地面積達 100 平方公尺以上，為土污法第 8 條第 1 項及第 9 條指定公告之事業。業者為避免因出售污染土地引起糾紛，及發生污染責任問題，於工廠土地移轉、設立、停業或歇業前，應依法進行土壤污染檢測，不僅可釐清污染責任，亦為企業應盡之社會義務。

一、土壤污染檢測資料

依土污法施行細則第 7 條規定，土污法第 9 條所定之「土壤污染檢測資料」應包含下列項目：

(一) 事業基本資料

事業名稱及負責人、統一編號、地址、地政編號、土地使用類別、廠區配置圖、土地使用人、管理人或所有人及聯絡方式等。

(二) 事業運作情形

生產製程、使用原料、產品、污染來源、污染物種類與成分、處理情形及相關污染防治措施。

(三) 檢測及分析結果

檢測項目、採樣檢測方法、檢測數量及品保品管等。

(四) 檢測機構

機構名稱、地址及許可文件影本。

(五) 其他經主管機關指定之資料

為便於事業準備相關應檢具文件，茲依據施行細則第 7 條所定項目，訂定「土壤污染檢測資料」格式、內容及填寫說明供事業及相關單位參考。

二、工廠用地土壤污染檢測

(一) 委託執行單位

業者可考量委託專家顧問、技術顧問機構或檢測機構，協助工廠進行地土壤污染檢測相關工作，並依土污法第 10 條之規定，應委託經環檢所許可之檢測機構進行檢測，合格檢測機構資料可至環檢所網站(網址：<http://www.niea.gov.tw>)查詢。

在委託專家顧問、技術顧問機構或檢測機構之資格條件上，除土壤檢測分析工作須委由許可之檢測機構外，土污法對相關專業人員及機構尚未訂定相關資格條件。業者可暫依據專業人員及機構所提出之人員學經歷、過去曾執行環境場址評估或土壤、地下水污染調查工作之實績經驗等資料，選擇適當的專業人員及機構辦理。

(二) 土壤採樣方式

環保署為協助業者執行土壤污染檢測，研擬「環境場址潛在污染評估辦理事業用地污染檢測參考指引」與「網格法辦理事業用地土壤污染檢測參考指引」，供業者參考選用，相關參考指引可至環保署土基會網站(網址：<http://ww2.epa.gov.tw/SoilGW/index.asp>)下載。

1. 環境場址潛在污染評估辦理事業用地污染檢測參考指引

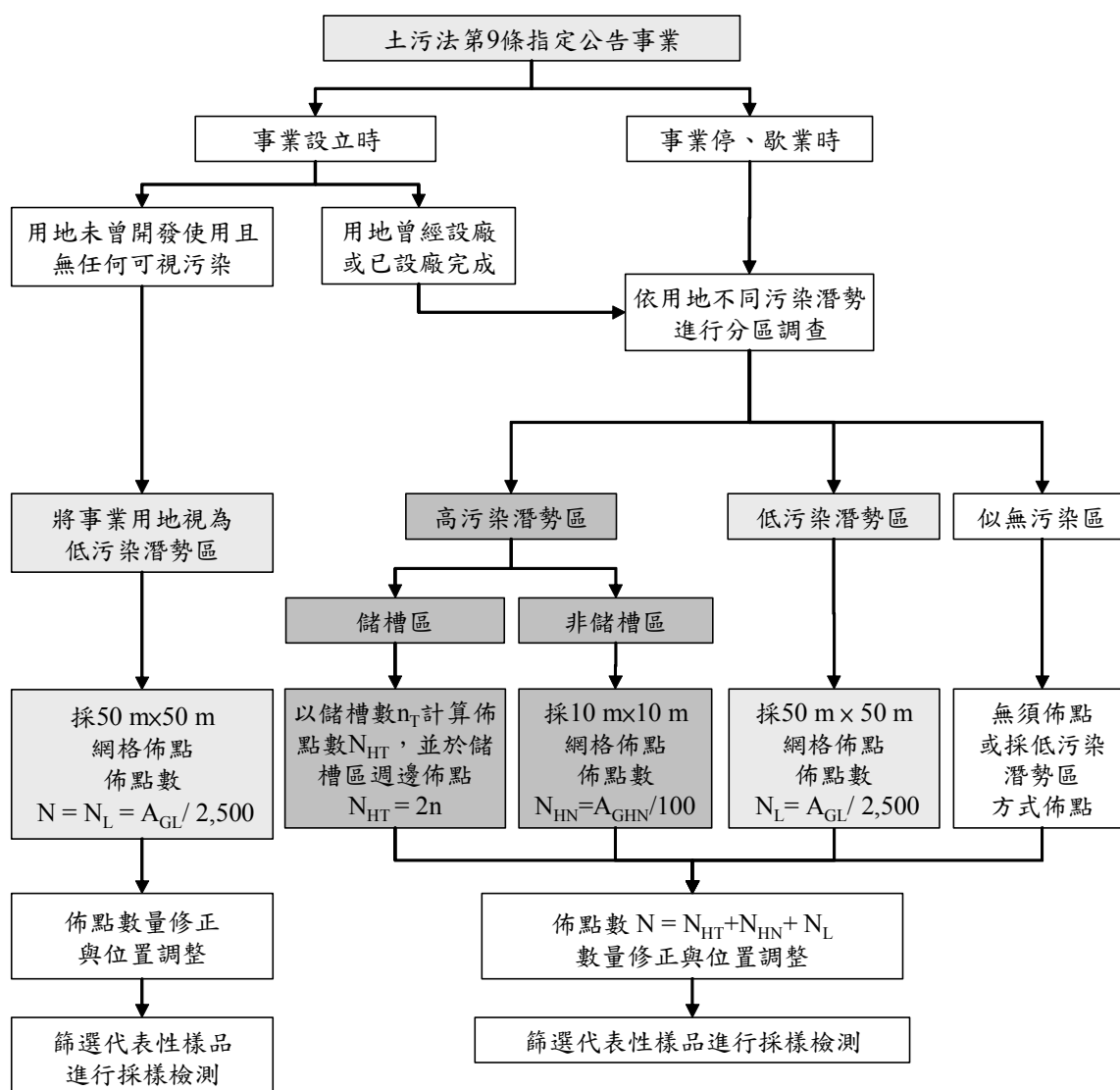
依環保署「環境場址潛在污染評估辦理事業用地污染檢測參考指引」建議之最少土壤採樣點數如表 7-2 所示。

表 7-2 環境場址潛在污染評估之最少土壤採樣點數^[1]

事業用地面積(A)	最少採樣點數
$A < 100$ 平方公尺	2
$100 \text{ 平方公尺} \leq A < 500 \text{ 平方公尺}$	3
$500 \text{ 平方公尺} \leq A < 1,000 \text{ 平方公尺}$	4
$1,000 \text{ 平方公尺} \leq A$	10

2. 網格法辦理事業用地土壤污染檢測參考指引

針對已設廠或曾經使用過之事業用地，可依其土地使用狀況與污染潛勢劃分為高污染潛勢區、低污染潛勢區與似無污染區分別進行調查規劃，分區規劃亦可參考「以環境場址潛在土壤污染評估辦理事業用地土壤污染檢測參考指引」執行資料審閱、場址勘查與訪談等程序後，綜合評析規劃。若事業於設立時，其用地未曾開發使用且無任何可視之污染，則得參考低污染潛勢區之網格調查方式辦理。有關網格法(儲槽區除外)採樣佈點之規劃流程如圖 7-1 所示。



A_{GHN} ：以10 m×10 m網格所涵蓋高污染潛勢區內非儲槽區之網格面積

A_{GL} ：以50 m×50 m網格所涵蓋低污染潛勢區之網格面積

N_{HN} ：高污染潛勢區內非儲槽區10 m×10 m網格佈點數

N_{HT} ：儲槽區佈點數

N_L ：低污染潛勢區50 m×50 m網格佈點數

N ：總佈點數

n_T ：總儲槽數

面積單位：平方公尺

註1：於採樣過程中，若發現由土壤外觀可明顯研判其物化性質異於場址或附近土壤性質時即應參採高污染潛勢區之調查佈點方式辦理或調整佈點數量與位置。

註2：土污法第8條第1項之指定公告事業若採本方式進行調查採樣時，採樣佈點數與檢測項目得依事業製程與用地現況特性，由土地移轉雙方自行協議決定。

圖 7-1 環保署網格法進行採樣佈點之規劃流程^[2]

(三) 土壤污染檢測項目擇定

1. 依據環保署 93 年 12 月 7 日修正公告之「土壤及地下水污染整治法第八條第一項之事業」及「土壤及地下水污染整治法第九條之事業」之附表，鋼鐵冶鍊業依主要製程，污染物檢測項目如表 7-3 所示。

表 7-3 鋼鐵冶鍊業污染物檢測項目

主要製程	檢測項目
煉焦製程	VOC、TPH
煉鐵製程	鉛、鋅、TPH
轉爐煉鋼製程	鉛、鋅、TPH
電弧爐煉鋼製程	鋅、鉛、鎘、銅、鉻、鎳、TPH

2. 經評估，工廠未曾運作可能產生土壤污染管制項目之化學物質時，則可考量不進行土壤檢測，惟如曾運作土壤污染管制項目以外，且國內、外研究發現具有危害人體健康之化學物質時，則考量檢測該污染物項目。

三、土污法第 8、9 條相關問題與因應對策

有關土污法第 8、9 條相關問題與因應對策，如表 7-4 所示。

表 7-4 土污法第 8、9 條規定之相關問題與因應對策^[3]

問題	因應對策
一、若事業新增購或是新租用一塊地新設製程廠房，這是否屬於新設立範圍？若是屬於新設立範圍，那所採樣的範圍是否應該涵蓋舊有廠區還是以新廠區為主？	若事業於廠區外新增購或租用一塊地新設廠房者，除需辦理工廠登記外，亦符合土污法第 9 條設立前之時機。若事業於原廠區用地內新(擴)建廠房設施，且該廠房已符合工廠管理輔導法需重新申請工廠設立或登記者，則應針對該新(擴)建用地於整地施工前完成土壤污染檢測。
二、事業變更登記產業類別或產品增減時，是否亦需提具土壤污染檢測資料備查？若是的話，是否每一次辦理變更登記就必須整個廠區檢測一次？	依土污法第 9 條之規定，僅規範設立、停業或歇業前應進行用地土壤污染檢測，條文中並未將變更之時機納入，故事業僅進行基本資料之變更(如廠名、負責人姓名等)時，並不需提送土壤污染檢測資料備查之動作，惟若事業變更內容已符合各目的事業主管機關法規所規定應重新辦理設立之許可、登記、申請執照等相關行為時(如事業變更登記產業類別並需依工廠管理輔導法第 16 條第 3 項重新辦理設立許可或登記)，且變更後重新登記之事業類別屬於土污法第 9 條指定公告事業，則應進行用地土壤污染檢測及備查作業。

表 7-4 土污法第 8、9 條規定之相關問題與因應對策^[3] (續 1)

問題	因應對策
三、若事業將土地出租，是否受土污法第 8 條土地移轉應提供土壤污染檢測資料之規範？	土地承租如無涉及土地所有權(物權)之移轉，則不受土污法第 8 條之規範。惟為保障土地所有人之自身權益，建議以契約約定方式，要求土地承租人或使用人於終止租(使)用時提供土壤檢測資料以釐清污染責任。若承租人為環保署指定公告之 18 類事業，則所承租之土地移轉時，土地所有權人(即讓與人)應依土污法第八條規定提供土壤污染檢測資料。
四、若事業於土地移轉時依規定提供土壤污染檢測資料，內容與規格符合第 9 條資料規定之要求，且檢測後至下一事業新設立前無任何運作行為，則新設事業是否得以援用上一手事業提供之土壤污染檢測資料，不受 6 個月期限之限制？	土壤污染檢測作業之完成應於報請所在地主管機關備查前 6 個月內為之，惟事業若符合下列所有情形，且經所在地主管機關同意者，得於土壤污染檢測資料中載明理由後，不受 6 個月限制： 1. 自採樣日起用地內無從事任何運作行為。 2. 採取適當圍籬、區隔、監視或防護措施，確保無排放、洩露、灌注或棄置污染物於事業用地範圍內。 3. 毗鄰用地無潛在污染源存在，並可能導致污染物擴散傳輸至事業用地範圍內。 4. 檢測當時之事業與備查時之事業，其類別、製程及運作特性均相同。
五、公告附表所列之檢測項目並非所有事業皆有使用或產生，是否皆需檢測？若事業製程並不在公告範圍中，則應如何擇定檢測項目？	由於各事業之運作歷史、特性和使用原物料不盡相同，故建議事業應將相關運作資料委由具相關學經歷之專業人員或技術機構進行評析後，擇定應檢測之污染物項目。若評估後事業用地確未曾運作某項檢測項目，則可於「土壤污染檢測資料」中載明理由；但除規定之檢測項目外，事業亦應依其實際運作狀況增加污染物項目之檢測。此外針對土地移轉之時機，其土壤檢測項目建議由土地移轉雙方協議定之。
六、土壤污染調查採樣方式是否一定需依照網格法或環境場址潛在土壤污染評估(ESA)方式辦理？	有關環保署提供之「環境場址潛在土壤污染評估辦理事業用地土壤污染檢測參考指引」及「網格法辦理事業用地土壤污染檢測參考指引」僅供參考，事業仍應依其運作特性選擇適合之方式辦理土壤污染調查檢測。若經評估後有其他更適合之調查方式，則事業亦得參採，惟須於土壤污染檢測資料中提出說明。

表 7-4 土污法第 8、9 條規定之相關問題與因應對策^[3] (續 2)

問題	因應對策
七、事業用地位於廠辦大樓 2 樓以上無用地可供採樣，應如何進行檢測？	若事業場所全部用地均位於建築物內之 2 樓以上，而無土地可供土壤採樣，並經評估後確認事業用地確無污染之虞時，則可於土壤污染檢測資料中具明理由並檢附相關資料，送所在地主管機關備查。
八、事業機構若有執行土壤污染檢測工作需要時，可以委託哪些單位辦理？	依土污法第 10 條第 1 項規定，土壤及地下水污染檢測作業應委託由環保署核可的檢測機構執行。至於執行調查評估規劃之人員或機構，現行土污法中並未限定其資格條件，惟建議事業宜委由具環境場址評估或土壤地下水污染調查實務經驗之專家或技術機構辦理場址評估與採樣規劃工作，可獲得較具客觀性及代表性之結果。而相關人員或機構之資格條件，於環保署「環境場址潛在土壤污染評估辦理用地土壤污染檢測參考指引」中有說明，事業可於選擇時參考。
九、相關參考指引中提及土壤調查檢測的部分較多，而在地下水方面卻較少，檢測範圍是否應包括地下水在內？	土污法第 8 條及第 9 條僅規範提具用地土壤污染檢測資料，並未包括地下水，因此相關調查參考指引及檢測資料之內容並未將地下水污染物納入。但建議事業可依本身製程特性與用地狀況，增加地下水調查檢測，以更完整掌握用地環境狀況。
十、目的事業主管機關若無停歇業之相關規定，則停歇業前是否仍須進行土壤污染檢測並將檢測資料提送備查？	進行土壤污染檢測之意義在於藉由用地之調查檢測，儘早瞭解土壤污染狀況及作好預防或整治工作，於土地有污染情事發生時，可作為釐清污染責任之參考依據。另按照土污法第 9 條之公告內容，停業或歇業前之檢測時機並不僅限於向目的事業主管機關申辦停業或歇業時才需進行土壤檢測，而是包括事實認定情形；即只要事業事實上終止營業(運)或無繼續生產、製造、加工前，即需完成土壤污染檢測資料及提送所在地主管機關備查。
十一、土污法第 9 條是否有溯及既往？目前營運中之事業是否僅需於停、歇業前辦理土壤檢測即可？	土污法第 9 條之實施並無溯及既往的規定，指定公告事業於 94 年 1 月 1 日(含)後辦理設立、停業或歇業時，始須依據土污法第 9 條規定辦理。此外，運作中之事業若無重新設立、停業或歇業之行為，則無立即進行土壤污染檢測之必要，惟為瞭解事業本身用地之土壤環境狀況，建議平時亦可進行調查檢測，以及早發現可能問題，並因應處置。

7.3 工廠遭土污法列管之作業程序與因應對策

工廠因超過土壤及地下水污染管制標準時，環保機關依土污法之相關規定進行工廠土地列管，其列管作業流程如圖 7-2 所示。列管作業大致可分為調查查證、控制整治及解除管制第 3 階段，各階段與業者相關之規定，包括工廠遭土水污染時可採取之應變措施、工廠被通知查證時之因應對策、工廠遭公告控制或整治場址之因應對策等，說明如下。

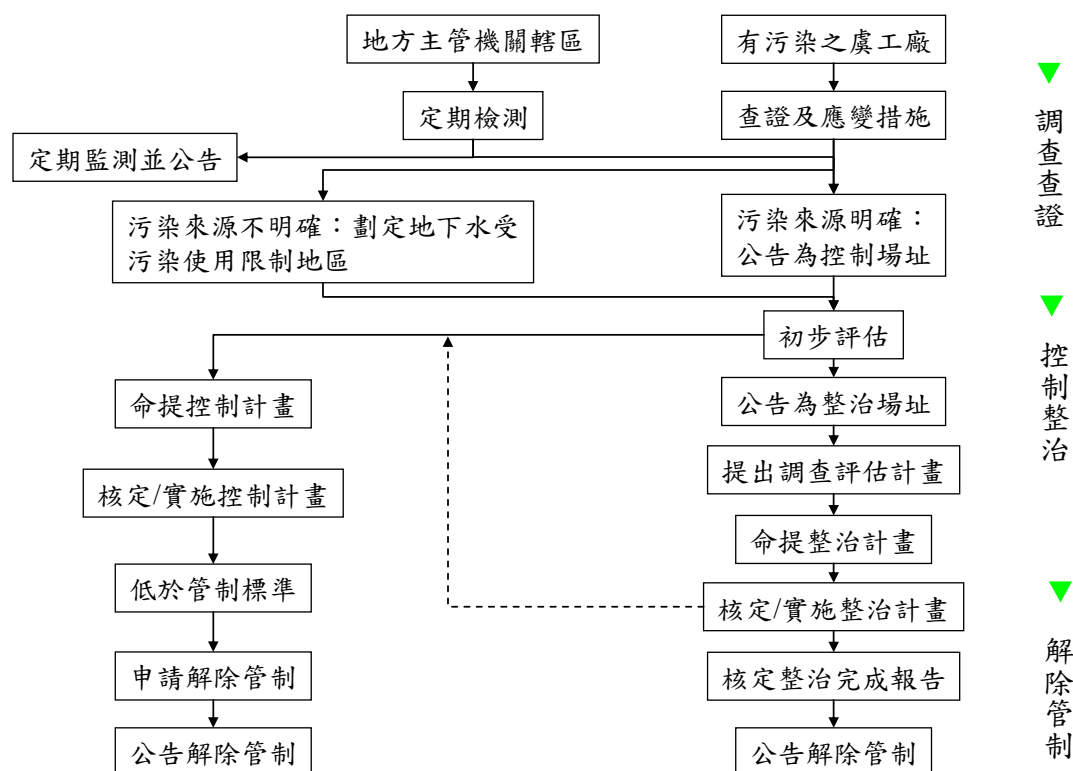


圖 7-2 環保機關對工廠土壤及地下水污染場址管制作業流程

一、工廠遭土水污染時可採取之應變措施

(一) 土污法規定

- 土污法第 7 條第 5 項：「各級主管機關為查證工作時，發現土壤、地下水因受污染而有影響人體健康、農漁業生產或飲用水水源之虞者，應命污染行為人、場所使用人、管理人或所有人採取緊急必要措施，以減輕污染影響或避免污染擴大。」
- 土污法第 13 條第 1 項規定，所在地主管機關為減輕污染危害或避免污染擴大，應依控制場址或整治場址實際狀況，採取應變必要措施，同條第 2 項規定所在地主管機關對於下列之應變必要措施，得

命污染行為人為之。

- (1) 提供必要之替代飲水或通知自來水主管機關優先接裝自來水。
- (2) 豎立告示標誌或設置圍籬。
- (3) 移除或清理污染物。
- (4) 其他應變必要措施。

(二) 罰則

1. 刑法與罰金

土污法第 26 條：「違反第七條第五項未採取必要措施或不遵行所在地主管機關依第十三條第一項第一款、第二項所為之命令，因而致人於死者，處無期徒刑或七年以上有期徒刑，得併科新臺幣五百萬元以下罰金。致重傷者，處三年以上十年以下有期徒刑，得併科新臺幣三百萬元以下罰金。」

2. 連續處罰

土污法第 32 條：「未遵行第七條第五項、第十三條第二項之命令者，處新臺幣二十萬元以上一百萬元以下罰鍰，並得按次處罰。」

(三) 因應對策

工廠發現土壤及地下水遭污染時，首先應確認土壤及地下水污染來源及原因，若是因廠內製程或處理設施洩漏所造成，應立即進行修補或阻斷污染來源，避免持續洩漏，造成污染擴大；事業對已遭污染之土壤或地下水，應確認可能污染範圍及影響，決定是否需採取污染相關控制或圍堵措施，或依土污法第 7 條第 5 項採取之「緊急必要措施」，請參考本技術手冊第 3.4 節「緊急事件準備及應變」之相關說明。

二、工廠被通知查證時之因應對策

(一) 土污法規定

1. 土污法第 7 條第 1 項，各級主管機關得派員攜帶證明文件，進入公私場所，為下列查證工作，並得命場所使用人、管理人或所有人提供有關資料：
 - (1) 調查土壤、地下水污染情形及土壤、地下水污染物來源。

(2) 進行土壤、地下水或相關污染物採樣。

(3) 會同有關機關採集農漁產品樣本。

2. 土污法第 11 條第 1 項規定：「各級主管機關對於有土壤或地下水污染之虞之場址，應即進行查證，...」。

(二) 罰則

土污法第 32 條第 1 項：「規避、妨礙或拒絕依第七條第一項...所為之查證、命令或應配合之事項者，處新臺幣二十萬元以上一百萬元以下罰鍰，並得按次處罰。」

(三) 因應對策

當環保機關通知業者要進廠查證時，於查證前，工廠宜召開會議，針對廠內運作可能產生污染及地下水污染之情形，再次進行檢視及巡查，並完成相關資料準備。如發現污染情形，應即採取緊急應變措施。於查證時，應指派人員陪同環保機關人員，以全程掌握查證情形，必要時，於環保機關進行採樣之同時，業者可請求進行樣品分樣及檢測，並留存查證及現勘紀錄。於查證後，環保機關如通知業者樣品超過管制標準，擬公告場址為控制場址時，如事業分樣樣品未超過管制標準，事業可請求再次進行採樣檢測；或於環保機關公告場址為控制場址前，請求環保機關依土污法施行細則第 8 條規定，同意事業限期採取適當措施，以改善污染情形。

環保機關進行查證時，因其採樣點數有限，故通常無法掌握場址之污染情形，因此，事業應參考環保機關於查證時之採樣檢測資料，依已完成之檢測結果及工廠實際之運作狀況，研判污染來源，並進一步調查評估污染範圍。有關土壤及地下水污染範圍調查評估工作，請參考本技術手冊第四章「土壤及地下水污染調查」之相關說明。

事業於完成污染改善後，需請環保機關再次進行污染場址之驗證。此外，依土污法施行細則第 8 條第 2 項規定，污染場址因採取適當措施，致土壤、地下水污染情形減輕，並經所在地主管機關查證其土壤、地下水污染物濃度低於土壤、地下水污染管制標準者，得不公告為控制場址。

三、工廠遭公告控制場址之因應對策

(一) 土污法規定

1. 環保局公告控制場址

土污法第 11 條第 2 項：「...場址之土壤污染或地下水污染來源明確，其土壤或地下水污染物濃度達土壤或地下水污染管制標準者，所在地主管機關應公告為土壤、地下水污染控制場址，...」

2. 業者提出控制計畫

土污法第 11 條第 4 項：「控制場址未經公告為整治場址者，所在地主管機關得依實際需要，命污染行為人提出污染控制計畫，經所在地主管機關核定後實施。」

3. 業者申請解除控制場址管制

土污法第 11 條第 5 項：「...控制場址之土壤或地下水污染控制計畫實施後，如土壤或地下水污染物濃度低於土壤或地下水污染管制標準時，得向所在地主管機關申請解除控制場址之管制並公告之。」

4. 環保局核准解除控制場址之管制

土污法第 20 條第 1 項：「土壤、地下水污染控制計畫...之實施者，應於土壤、地下水污染整治完成後，準用第十六條第一項或第二項之程序，將其整治完成報告報請所在地...主管機關核准。」經核准後，並依同條第 2 項第 1 款之規定，解除控制場址之管制。

(二) 罰則

土污法第 36 條：「污染行為人違反第十一條第四項...，處新臺幣一百萬元以上五百萬元以下罰鍰，並通知限期補正或改善，屆期未補正或改善者，按日連續處罰。」

(三) 因應對策

業者應依土污法施行細則第 14 條之規定，提出污染控制計畫，其內容應包括下列事項：

1. 計畫提出者、撰寫者及執行者資料。
2. 場址基本資料。
3. 場址現況及污染情形。
4. 污染物、污染範圍及污染程度。
5. 污染控制及防治方法。
6. 污染監測方式。

7. 工地安全衛生管理。
8. 控制結果之驗證方式。
9. 計畫執行期程。
10. 其他經主管機關指定之事項。

另有關土壤及地下水污染控制計畫撰寫指引(93.08.26)，可由環保署環保法規網頁(網址：<http://w3.epa.gov.tw/epalaw/index.aspx>)下載。

土壤及地下水污染控制計畫經所在地主管機關核定後實施，事業於完成污染改善後，請環保機關進行污染場址之驗證。依土污法相關規定，申請解除控制場址之管制。

四、工廠遭公告整治場址之因應對策

(一) 土污法規定

1. 環保署公告整治場址

土污法第 11 條第 2 項：「...控制場址經初步評估後，有危害國民健康及生活環境之虞時，所在地主管機關應報請中央主管機關審核後公告為土壤、地下水污染整治場址...」

2. 初步評估

環保署於 95 年 3 月 29 日修正「土壤及地下水污染控制場址初步評估辦法」(以下簡稱初評辦法)，除增訂控制場址公告為整治場址之場址特性及污染影響等評估條件外，初評辦法第 6 條及第 7 條並允許污染場址之污染行為人及土地使用人、管理人或所有人得以健康風險評估結果，送所在地主管機關審查污染場址是否仍須公告為整治場址並管制，以及相關審查流程，以作為所在地主管機關是否須報請中央主管機關公告為整治場址之依據，其流程如圖 7-3 所示。

3. 業者提出調查評估計畫

土污法第 12 條第 2 項：「整治場址之污染行為人或污染土地關係人，得於各級主管機關進行調查評估前，提出土壤、地下水調查及評估計畫，經所在地主管機關核定後辦理；其調查評估結果，應報請所在地主管機關核定。」

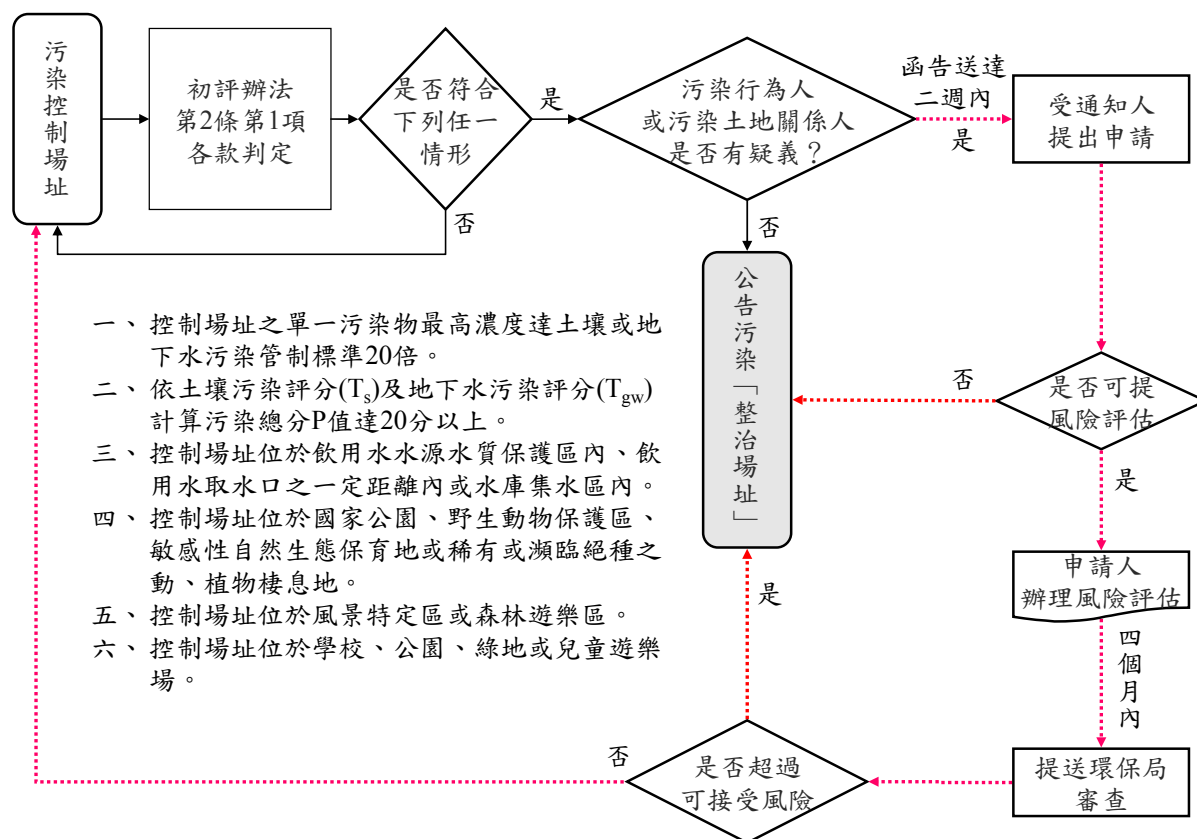


圖 7-3 初評辦法之評估程序

4. 業者提出整治計畫

土污法第 16 條第 1 項：「整治場址之污染行為人應依第十二條之調查評估結果，訂定土壤、地下水污染整治計畫，經所在地主管機關審查核定後據以實施...。」

5. 環保局核准整治場址之列管

土污法第 20 條第 1 項：「土壤、地下水...污染整治計畫之實施者，應於土壤、地下水污染整治完成後，準用第十六條第一項或第二項之程序，將其整治完成報告報請...中央主管機關核准。」，經核准後，並依同條第 2 項第 1 款之規定，解除控制場址之管制。

(二) 罰則

土污法第 36 條：「污染行為人違反...第十六條第一項...，處新臺幣一百萬元以上五百萬元以下罰鍰，並通知限期補正或改善，屆期未補正或改善者，按日連續處罰。」

(三) 因應對策

業者應依土污法施行細則第 21 條之規定，提出污染整治計

畫，其內容應包括下列事項：

1. 計畫提出者、撰寫者及執行者之資料。
2. 計畫大綱。
3. 場址基本資料。
4. 場址現況及污染情形。
5. 污染物、污染範圍及污染程度。
6. 整治基準或整治目標。
7. 整治方法。
8. 污染監測計畫。
9. 污染防治計畫。
10. 場址安全衛生計畫。
11. 整治完成之驗證計畫。
12. 整治經費預估。
13. 整治期程。
14. 其他經主管機關指定之事項。

另有關土壤及地下水污染整治計畫撰寫指引(93.08.26)，可由環保署環保法規網頁(網址：<http://w3.epa.gov.tw/epalaw/index.aspx>)下載。

土壤及地下水污染整治計畫經所在地主管機關核定後實施，事業於完成整治後，請環保機關進行污染場址之驗證。依土污法相關規定，申請解除整治場址之列管。

7.4 土污法相關訴願程序或行政訴訟

有關行政爭訟程序流程如圖 7-4，並說明如下：

一、訴願

訴願案件流程處理，如圖 7-5 所示。訴願相關表格文件，包括訴願書、委任書、參加訴願申請書、言詞辯論申請書、陳述意見申請書、閱覽卷宗申請書、訴願撤回申請書與訴願代表人選任書等，可由環保署訴願審議委員會網站下載。

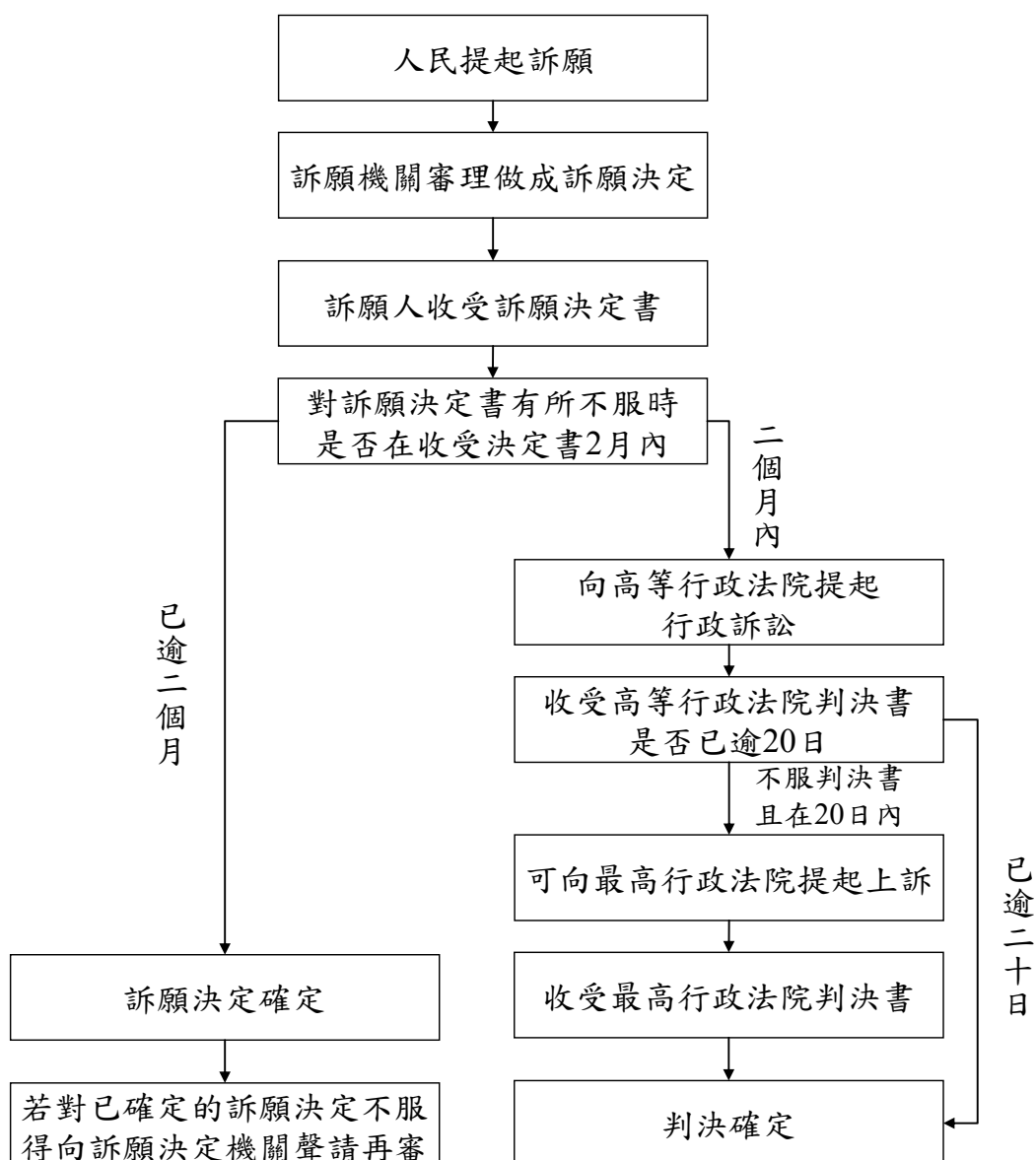


圖 7-4 行政爭訟流程圖^[4]

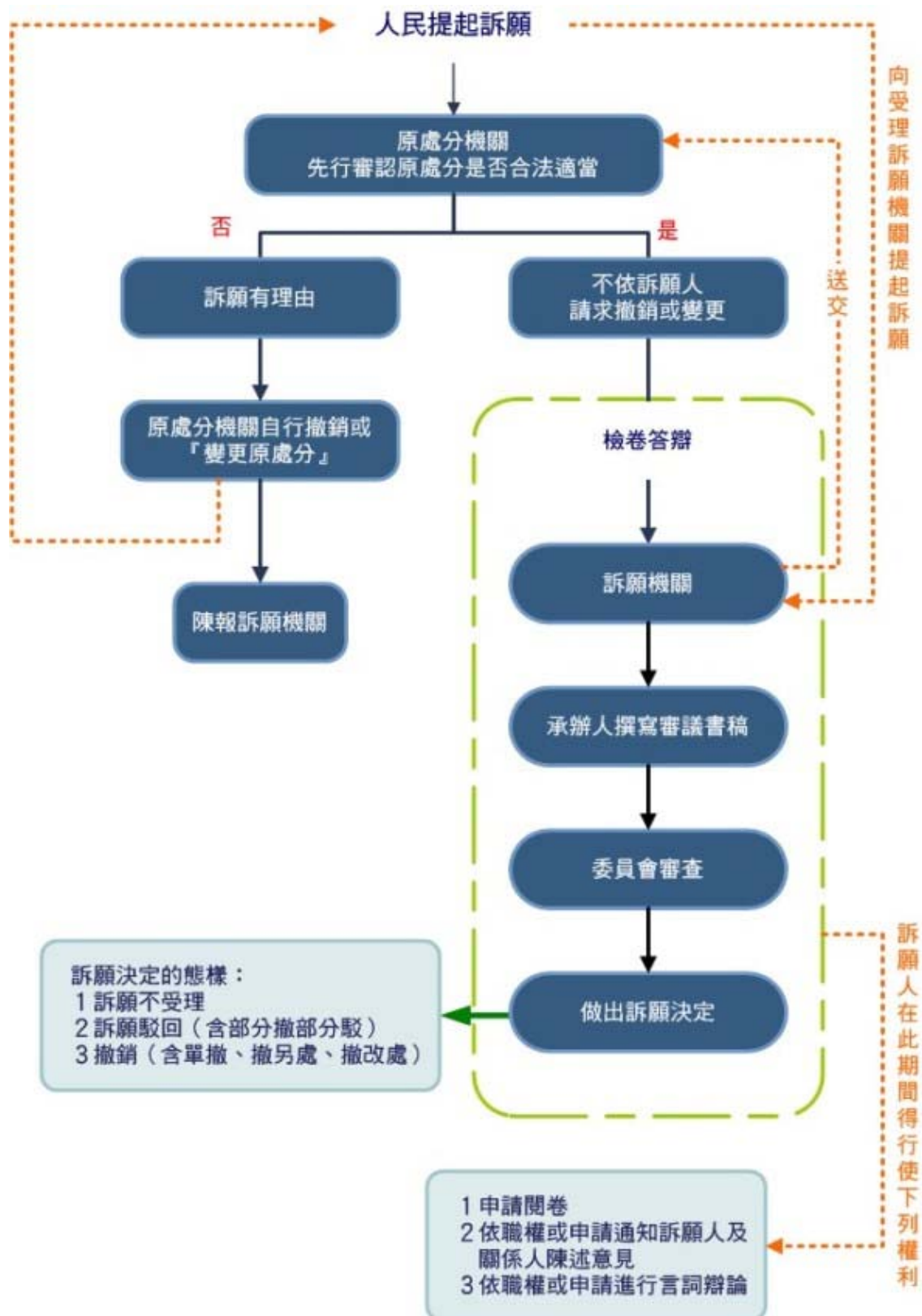


圖 7-5 訴願案件流程處理簡圖^[4]

(一) 訴願時機

人民對行政機關之行政處分，認為違法或不當，致損害其權利或利益時，得提起訴願。

(二) 訴願期間

提起訴願應自行政機關之行政處分書達到之次日起，於 30 日內繕具訴願書並送達原處分機關。

(三) 訴願之受理機關

1. 不服鄉(鎮、市)公所之行政處分者，向縣(市)政府提起訴願。
2. 不服縣(市)政府所屬各級機關之行政處分者，向縣(市)政府提起訴願。
3. 不服縣(市)政府之行政處分者，向中央主管部、會、行、處、局、署提起訴願。
4. 不服直轄市政府所屬各級機關之行政處分者，向直轄市政府提起訴願。
5. 不服直轄市政府之行政處分者，向中央主管部、會、行、處、局、署提起訴願。
6. 不服中央各部、會、行、處、局、署所屬機關之行政處分者，向各部、會、行、處、局、署提起訴願。
7. 不服中央各部、會、行、處、局、署之行政處分者，向主管院提起訴願。
8. 不服中央各院之行政處分者，向原院提起訴願。

(四) 訴願書應記載事項

1. 載明訴願人姓名、出生年月日、住居所、身分證明文件字號，如有法人或其他設有管理人或代表人之團體，其名稱、事務所、或營業所及管理人或代表人之姓名、出生年月日、住居所。
2. 多人共同訴願時，應選出三人以下之代表人，並檢附代表委任書。
3. 原行政處分機關之全銜。
4. 訴願請求事項。(如原處分撤銷或原處分某一部分撤銷等等)
5. 訴願之事實及理由。

6. 收受獲知悉行政處分之年、月、日。
7. 受理訴願之機關。
8. 證據。其為文書者，應添具繕本或影本。
9. 年、月、日。
10. 訴願人簽名蓋章，如有代表人或代理人亦同。

(五) 訴願書附件

訴願應附原處分書影本。

(六) 訴願之補充理由及說明：

訴願人提起訴願後，對於事實及理由有不充足時，在審決之前隨時得提出訴願補充理由。又訴願人認為訴願書不足敘明事實及理由時，可至訴願會請求陳訴意見，以說明訴願案件之事實及理由使承辦人員對案情能有更充分的瞭解。

二、不服訴願決定之後續處理方式

行政救濟制度，分為訴願、行政訴訟二級。如果不服訴願之決定，或訴願機關於人民提起訴願後3個月內不為決定，或延長訴願決定期間逾2個月仍不為決定者，人民即得向高等行政法院提起行政訴訟，無須再經過訴願之程序，如不服高等行政法院之裁判者，得向最高行政法院上訴或抗告。

當訴願決定確定後，不服該訴願決定，依訴願法再審制度的設計，只要有下列情形之一者，得向原訴願決定機關申請再審：

- (一) 適用法規顯有錯誤者。
- (二) 決定理由與主文顯有矛盾者。
- (三) 決定機關之組織不合法者。
- (四) 依法令應迴避之委員參與決定者。
- (五) 參與決定之委員關於該訴願違背職務，犯刑事上之罪者。
- (六) 訴願之代理人，關於該訴願有刑事上應罰之行為，影響於決定者。
- (七) 為決定基礎之證物，係偽造或變造者。
- (八) 證人、鑑定人或通譯就為決定基礎之證言、鑑定為虛偽陳述者。
- (九) 為決定基礎之民事、刑事或行政訴訟判決或行政處分已變更者。

(十) 發現未經斟酌之證物或得使用該證物者。

申請再審，原則上應自訴願決定確定時起算 30 日內為之。

三、行政訴訟第一審

(一) 起訴：

1. 起訴應向管轄之高等行政法院提出訴狀為之。
2. 起訴狀應使用司法狀紙，並表明下列事項：

(1) 當事人：

- A. 當事人為自然人者，應記載當事人姓名、性別、年齡、身分證明文件字號、職業及住所或居所。
- B. 當事人為法人、機關或其他團體者，應記載其名稱及所在地、事務所或營業所。
- C. 有法定代理人、代表人或管理人者，應記載其姓名、性別、年齡、身分證明文件字號、職業及住所或居所，及其與法人、機關或團體之關係。
- D. 有訴訟代理人者，應記載其姓名、性別、年齡、身分證明文件字號、職業及住所或居所。

(2) 起訴之聲明。

(3) 訴訟標的及其原因事實。

(4) 附屬文件及其件數，如經訴願程序者，應附具決定書。

(5) 高等行政法院。

(6) 年、月、日。

3. 當事人、法定代理人、代表人、管理人或訴訟代理人應於訴狀內簽名或蓋章，如以指印代替簽名時，應由他人代寫姓名，記明其事由並簽名。
4. 訴狀內宜記載適用程序上有關事項、證據方法及其他準備言詞辯論之事項。

(二) 起訴狀應按被告人數附具起訴狀繕本。

(三) 起訴有無逾越法定期限，以高等行政法院收受訴狀之時間為準。

四、行政訴訟第二審

(一) 上訴理由：

1. 對於高等行政法院之終局判決不服，須以其違背法令為理由，始得向最高行政法院上訴。
2. 判決不適用法規或適用不當者，為違背法令。
3. 有下列情形之一者，其判決當然違背法令：
 - (1) 判決法院之組織不合法者。
 - (2) 依法律或裁判應迴避之法官參與裁判者。
 - (3) 行政法院於權限之有無辨別不當或違背專屬管轄之規定者。
 - (4) 當事人於訴訟未經合法代理或代表者。
 - (5) 違背言詞辯論公開之規定者。
 - (6) 判決不備理由或理由矛盾者。

(二) 上訴：

1. 上訴應向原判決之高等行政法院提出上訴狀為之。
2. 上訴狀應使用司法狀紙，並表明下列事項：
 - (1) 當事人。
 - (2) 高等行政法院判決及對於該判決上訴之陳述。
 - (3) 對於高等行政法院判決不服之程度，及應如何廢棄或變更之聲明。
 - (4) 上訴理由；並應附具關於上訴理由之必要證據。
 - (5) 行政法院。
 - (6) 年、月、日。
3. 當事人、法定代理人、代表人、管理人或訴訟代理人應於訴狀內簽名或蓋章，如以指印代替簽名時，應由他人代寫姓名，記明其事由並簽名。
4. 上訴狀內未表明上訴理由者，上訴人應於提起上訴後 20 日內提出理由書於原高等行政法院，未提出者，原高等行政法院會直接裁定駁回上訴。

5. 對簡易訴訟事件之判決提起上訴，須經最高行政法院之許可，因此必須在上訴理由中具體表明該訴訟事件所涉及之原則性法律見解。

(三) 上訴狀應按被上訴人(對造)人數附具上訴狀繕本。

(四) 上訴期間：

1. 提起上訴，應在第一審判決送達後之 20 日內為之。
2. 上訴有無逾越上訴期間，以行政法院收受上訴狀之時間為準。

參考文獻

1. 環保署，環境場址潛在污染評估辦理事業用地污染檢測參考指引。
2. 環保署，網格法辦理事業用地土壤污染檢測參考指引。
3. 環保署，土壤及地下水污染整治法第 8 條第 1 項及第 9 條指定公告事業執行土壤污染檢測宣導手冊，民國 94 年 12 月。
4. 環保署訴願審議委員會網站(網址：<http://atftp.epa.gov.tw/peti/epa/Index.htm>)

名詞索引

一劃	頁次
一貫作業煉鋼廠	3, 4, 11, 13, 19
二劃	
X 射線螢光偵測器(X-ray fluorescence)	63, 64
三劃	
三合系統(triad system)	183
土壤及地下水污染控制計畫撰寫指引	189
土壤及地下水污染整治費	201
土壤污染檢測資料	47, 205, 208~210
土壤物理分離/酸溶出(physical separation and acid leaching)	163
土壤氣體抽除法(soil vapor extraction , SVE)	103~105, 132~135, 160, 172
土壤清洗法(soil washing)	95, 98, 163
土壤需氧量(SOD)	100
土鑽採樣組(hand-held auger)	55
中空螺旋鑽機	57
四劃	
分區採樣	59
孔隙體積(pore volume , PV)	101
毛緣層(capillary fringe)	29, 66, 159, 160
水力阻絕(hydrodynamic isolation)	114
水力傳導係數	87, 114, 142
水力坡降	28, 143, 150, 174
水相穩定化/固化(aqueous stabilization/solidification)	80
水淬高爐石	13, 14
火焰離子偵測器(Flame Ionization Detector , FID)	68, 69, 70, 225
井叢(nested wells)	134
五劃	
主觀判斷採樣	59
半揮發性有機物	56, 61, 62, 89, 138, 160, 172
可行性評估(feasibility study , FS)	182~185
可行性試驗(treatability test)	90, 91, 184
可據以推定的整治技術(presumptive remedy)	162
巨匣限(macro-encapsulation)	79, 85, 87
平行井	107, 134
生物通氣法(bioventing , BV)	105~108

生物補強(bioaugmentation)	138
生物漱洗法(bioslurping)	159~162
石油碳氫化合物	66, 104, 107, 134, 138, 160
未飽和層	29, 57, 66, 103~ 105, 132, 139, 142

六劃

交換作用	21
光離子偵測器(photoionization detector, PID)	68~70
共代謝式生物通氣法(cometabolic bioventing)	107
地下水監測井	26, 28, 38, 40, 59, 60, 66, 174
安全衛生計畫	195
有機黏土(organo-clays)	81
污染預防	32
污染團	27, 47, 60, 66, 114, 126, 160, 190, 193
行政訴訟	222

七劃

亨利常數	67, 134
匣限化(encapsulation)	79
吸油索	44
吸油棉	44
吸附法	119
含水層	23, 27~29, 56, 66, 100, 104, 114, 126, 132~134, 136, 137, 174
含金汞齊器(amalgamator)	65
快速篩試工具	38, 63
沉澱作用	22, 137
沉澱法	114~118
決策紀錄(record of decision)	184
系統及網格採樣	59
貝勒管(bailer)	58

八劃

固化/穩定化法(solidification/stabilization, S/S)	79, 87, 112
固化處理方式(solidification)	79
奈米過濾(nanofiltration)	117
底土(subsurface soil)	55
承諾採購(affirmative procurement)	32
抽水機	58

抽取處理法	100, 114, 125
抽氣井	103, 105, 107, 108, 172
抽除管	159, 161
注入井	100, 136, 137, 174
注氣井	105, 108, 134
油漬區(smear zone)	29, 30
介電常數(dielectric constant)	143
直接汞分析儀(direct mercury analyzer , DMA)	63, 65, 66, 71
直接貫入鑽機	56, 57
空氣注入法(air sparging , AS)	104, 106, 132~135, 173, 174
初評辦法	215, 216
表土(surface soil)	39, 55, 73, 74
軋鋼	3, 6, 7, 11, 12, 15~17, 20, 29
阻絕(containment)	114

九劃

垢化(fouling)	118, 120, 121, 123
活性炭(activtaed carbon)	81, 82, 109, 110, 120, 121, 124, 125, 139, 172
活性鋁(activated alumina)	119, 121
活塞式採樣器(piston rod soil sampler)	55
玻璃化法(vitrification)	92, 93, 112, 113
重質非水相液相污染物(DNAPL)	101

十劃

根層過濾(rhizofiltration)	151, 153, 154
氣冷高爐石	13, 14
氣相化學還原法(gas phase chemical reduction)	109
逆滲透(RO)	117~119, 170
高污染區域(hot spot)	47
高溫分離法(pyrometallurgical recovery)	97~99, 112, 113

十一劃

控制場址	48, 163, 173, 189, 190, 196, 212~216
採樣計畫	42, 52~54, 75
採樣鏟(hand-held shovel)	55
旋轉窯(rotary kiln)	109
混合採樣	59
現地土壤沖洗法(in-situ soil flushing)	99, 112
現地地下水生物整治法(in-situ groundwater bioremediation)	136~139, 174
符合性監測(compliance monitoring)	131, 132

連續式反應牆(continuous reactive barrier)	126
連續鑄造	3, 6, 8, 10, 11, 12, 16

十二劃

透水性反應牆(Permeable Reactive Barrier, PRB)	124~127, 130~132
透氣層	66, 132, 172
場址概念模式(site conceptual model, SCM)	47, 49~52
場址與組織環境評估(EASO)	30
揮發性有機物	51, 61, 62, 66, 67, 74, 81, 83, 88, 105, 111, 134, 138, 160, 162, 172
植生復育(phytoremediation)	150, 151, 155, 157, 158, 172
植物萃取(phytoextraction)	151~154
植物穩定(phytostabilization)	151~154
訴願	218~221, 224
超級基金(Superfund)	95, 104, 172, 181
超滲濾(ultrafiltration)	117
間接污染途徑(secondary pathway)	50
間接污染源(secondary source)	50

十三劃

微匣限(micro-encapsulation)	79, 85, 87
微波加熱(microwave heating)	93
微過濾(microfiltration)	117, 118
感應加熱(induction)	93
煉焦	3, 4, 11~14, 20, 208
煉鋼	5
煉鐵	5
電子接受者	136
電弧爐煉鋼	3, 7, 8, 17, 18, 29, 208
電泳	140, 142, 145
電動力法	139, 140, 142~146, 149
電滲透	140, 141, 142, 143
電滲透流率	140, 141, 144
電漿加熱(plasma heating)	93
電熱加熱(electric heating)	93
電遷移	140

十四劃

飽和層	29, 66, 104, 114,
-----	-------------------

-
- | | |
|---|---|
| | 132, 134, 136, 137,
139, 142, 160
159~161 |
| 漱洗管(slupe tube) | 126 |
| 漏斗通道式反應牆(funnel and gate system) | 136, 137 |
| 滲水渠道(infiltration gallery) | 37, 127, 187, 191,
194, 217 |
| 監測計畫 | 3, 10, 12, 16~18 |
| 精煉爐 | 40~44 |
| 緊急應變 | 39, 206, 207, 209 |
| 網格法 | 206 |
| 網格法辦理事業用地土壤污染檢測參考指引 | 66, 67 |
| 蒸氣壓 | 28, 29 |
| 輕質非水溶相液態污染物(LNAPL) | 140, 144, 146 |
| 酸鋒(acid front) | 47 |
| 閾值(threshold value) | |
| 十五劃 | |
| 劈管採樣器(split-barrel sampler) | 55 |
| 暴露途徑 | 50, 51 |
| 模場試驗 | 165, 167, 194 |
| 熱脫附法 | 108, 110 |
| 膠結穩定/固化處理(cementitious S/S) | 81 |
| 十六劃 | |
| 操作性監測(performance monitoring) | 132 |
| 整治列車(treatment train) | 112, 113, 116, 188 |
| 整治場址 | 2, 48, 71, 110, 134,
151, 157, 160, 189,
192, 201, 211, 213
~217 |
| 整治費申報 | 202 |
| 整治費計算 | 202 |
| 整治費費率 | 201 |
| 整治費繳納 | 201 |
| 整治費繳納方式 | 202 |
| 整治調查(remedial investigation, RI) | 182~184 |
| 歷史費用分析系統(historical cost analysis system, HCAS) | 187 |
| 濃度回升(rebound) | 114, 196 |
| 燒結 | 4, 5, 13, 14 |
| 應變叢集採樣 | 59 |
| 十七劃 | |
| 戴奧辛 | 16, 36, 37, 79, 91,
105, 108~111, 173 |
| 營養鹽 | 105~107, 136~138,
174 |
-

環境風險管理	25, 26
環境場址評估(environmental site assessment, ESA)	30, 59, 75, 183, 206, 210
環境場址潛在污染評估辦理事業用地污染檢測參考指引	206
薄管採樣器(thin-walled tubes sampler)	55
薄膜過濾法	117
十八劃	
簡單隨機採樣	59
雙套管採樣器(dual tube soil sampler)	55
雙幫浦浮油回收	160
穩定化處理(stabilization)	79
關切污染物	70, 174, 190, 192, 193
二十劃	
釋氧劑(oxygen releasing compound, ORC)	124, 138
釋氫劑(hydrogen release compound, HRC)	138
二十一劃	
攜帶式氣相分析儀(portable gas chromatographs)	68
二十三劃	
驗證計畫	189, 195, 196, 217
二十四劃	
鹼性催化分解法	109~111
二十七劃	
鑽堡	57, 58

鋼鐵冶煉業土壤及地下水污染預防與整治技術手冊
／江東法等編撰----初版，----臺北市：工業局，
民 95

面 ； 公分

含參考書目

ISBN-13：978-986-00-7821-3 (平裝)

ISBN-10：986-00-7821-1 (平裝)

1.土壤污染 — 防制 2.地下水 — 污染 — 防
制 3.鋼鐵業
445.94 95024289

鋼鐵冶煉業土壤及地下水污染預防與整治技術手冊

出版日期：中華民國九十五年十二月初版

發行人：陳昭義

總編輯：陳吉宏

審查委員：林華宇、張西龍、盧至人 (依姓氏筆劃排列)

編撰：江東法、何國華、林怡青、袁菁、陳呈芳、陳偉聖、劉敏信、
魏顯祥 (依姓氏筆劃排列)

發行所：經濟部工業局

台北市信義路三段 41-3 號

TEL：(02)2754-1255

FAX：(02)2704-0160

<http://www.moeaidb.gov.tw>

出版所：經濟部工業局

台北市信義路三段 41-3 號

TEL：(02)2754-1255

FAX：(02)2703-0160

<http://www.moeaidb.gov.tw>

中興工程顧問股份有限公司

台北市松山區 105 南京東路五段 171 號 14 樓

TEL：(02)2769-8388

FAX：(02)2763-4555

<http://www.sinotech.com.tw>

印刷承製：正楷有限公司

工本費：新台幣伍佰元整

版權所有 翻印必究

GPN：1009503792

ISBN：978-986-00-7821-3

